Bruno Béranger

# Les pompes à chaleur




ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

EYROLLES
Environnement

# LES POMPES À CHALEUR

**Dans la même collection**

Brigitte Vu. – **Récupérer les eaux de pluie**, G11984, 2006.

Paul de Haut. – **Chauffage, isolation et ventilation écologiques**, G12105, 2007.

Emmanuel Riolet. – **Le mini-éolien**, G12143, 2007.

Emmanuel Riolet. – **L'énergie solaire et photovoltaïque pour le particulier**, G12221, 2008.

Bruno Herzog. – **Le puits canadien**, G12141, 2008.

Bertrand Gonthiez. – **Utiliser l'eau de pluie**, G12275, 2008.

Paul de Haut. – **Construire une maison non toxique**, G12253, 2008.

Paul de Haut. – **Habitat sain et sans allergène**, G12371, 2008.

**Dans la collection « Les guides de l'habitat durable »**

Philippe Guillet. – **Le guide des piscines naturelles et écologiques**, G12348, 2008.

Michel Tissot. – **Le guide de l'énergie solaire et photovoltaïque**, G12332, 2008.

Brigitte Vu. – **Le guide de l'habitat passif**, G12365, 2008.

P. Nguyen, G. Daïd. – **Financez votre habitat écologique**, G12459, 2008

P. de Haut. – **Vivre sain au quotidien**, G12475, 2008.

Jean-Marc Percebois. – **Le guide du chauffage géothermique**, G12435, 2008.

# LES POMPES À CHALEUR

Bruno Béranger

2e ÉDITION
REVUE ET AUGMENTÉE

Cinquième tirage 2009

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

EYROLLES

Éditions Eyrolles
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

La 2e édition de cet ouvrage a fait l'objet d'un reconditionnement à l'occasion
de son 5e tirage (nouvelle couverture et nouvelle maquette intérieure).
Le texte de l'ouvrage reste inchangé par rapport au tirage précédent.



# Sommaire

# Remerciements

Je tiens à remercier les Éditions Eyrolles qui ont permis à cet ouvrage de voir le jour. Je remercie tout particulièrement Anne Garcia pour son aide tout au long de la rédaction et pour ses conseils avisés.

Pour les échanges techniques, j'exprime ma gratitude à Alain Goupy (Professeur de génie climatique au LTE de Sassenage), à Jean Cugat, à Farid Allab, à Claude Rouet, à Chanbon (webmaster du site « chaleurterre.com »), au bureau d'études thermiques Bastide Bondoux, ainsi qu'aux personnes et organismes qui par leurs expériences ont contribuées à enrichir mes connaissances.

J'ai également une pensée positive envers Raphaël Salingue, Christine et Thierry Clausse qui m'ont gracieusement fourni des clichés de leur installation de chauffage.

Merci également à l'Ademe et plus particulièrement à Monsieur Philippe LAPLAIGE, ingénieur au département des Énergies Renouvelables.

Bien entendu je n'oublierai pas de remercier tous les membres de ma famille pour leur soutien et leurs encouragements sans faille.

# Avant-propos

À l'heure où le prix des énergies fossiles explose, où une pénurie de pétrole se profile d'ici une à deux générations seulement, la bonne gestion énergétique devient primordiale.

En parallèle, la menace d'un changement climatique terrestre lié à l'activité humaine apparaît à présent indéniable.

Pour construire un avenir énergétique raisonné il convient d'agir sur deux leviers :

- Diminuer substantiellement notre consommation d'énergie primaire.
- Utiliser au mieux les énergies renouvelables.

Les pompes à chaleurs répondent à ces deux exigences puisqu'elles permettent de puiser économiquement des calories fournies naturellement et inépuisables.

Il est logique qu'actuellement nombres de personnes s'interrogent sur les moyens de faire baisser leur facture énergétique. D'ailleurs, l'état encourage financi rement les solutions qui offrent un bon usage des énergies (électricité, gaz, énergies renouvelables) et qui présentent le moins d'impacts négatifs sur l'environnement.

Ce livre aborde le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire par pompe à chaleur.

Pour les personnes qui découvrent les pompes à chaleur, une partie théorique est développée de la fa on la plus simple possible, mais suffisamment complète, pour bien comprendre leur fonctionnement. Des exemples concrets illustrent plusieurs solutions techniques avec quelques calculs simples. Nous faisons un tour d'horizon des différents type de pompes à chaleur et une large part est donnée aux systèmes géosolaires (appelés couram-

ment « géothermiques »), car ils appartiennent à une technologies encore jeune et en pleine expansion. Cette deuxième édition aide le lecteur à faire un choix pertinent, selon le climat, entre les pompes à chaleur géosolaires et les pompes à chaleur aérothermiques. Des encarts décrivent plus précisément certains points techniques pour les lecteurs désirant en savoir plus.

Les aspects périphériques d'une installation de chauffage par pompe à chaleur tel que la régulation de température, la protection électrique, le raccordement au réseau électrique, sont aussi exposés. Nous décrivons les principaux fluides frigorigènes utilisés, leur impact écologique et les perspectives d'avenir de ce mode de chauffage.

Plusieurs solutions pour la production d'eau chaude sanitaire par pompe à chaleur sont décrites et comparées.

Un chapitre est destiné à accompagner le futur acquéreur dans son choix parmi les différentes pompes à chaleur. Des tableaux comparatifs aident à déterminer la solution la plus adaptée à chacun sans oublier le cas des rénovations. Quelques observations techniques aideront éventuellement certains à cerner les machines les mieux réalisées.

Nous souhaitons que grâce à cet ouvrage, le lecteur s'approprie les connaissances nécessaires pour faire un choix pertinent pour chauffer son habitation et produire l'eau chaude sanitaire économiquement, grâce aux pompes à chaleur.

### Quel capteur ?

Du fait de leur emprise sur le sol, le marché des pompes à chaleur fonctionnant sur capteur plan risque de rester marginal à l'heure où la propriété foncière coûte de plus en plus cher. Si les forages profonds se banalisent, si les bonnes performances se confirment dans le temps et si leur coût diminue, ce type de captage tendra à remplacer de plus en plus souvent les capteurs plans.



# Un peu d'histoire

Le principe thermodynamique de la pompe à chaleur existe depuis bien longtemps (au début du XX^e siècle apparaissent les premiers réfrigérateurs domestiques fonctionnant à l'électricité). L'utilisation la plus connue, encore actuellement, demeure la réfrigération (domestique, industrielle et la climatisation). Vers le milieu du XX^e siècle, le chauffage des habitations était archaïque et basé essentiellement sur la combustion d'énergies fossiles à faible coût. Comment, dans ce contexte, le chauffage par pompe à chaleur aurait-t-il pu se développer ?

Les premières tentatives en France de généralisation des pompes à chaleur datent du début des années 1980, au cours du 2^e choc pétrolier. Il s'agissait du programme « Perche » (Pompe à chaleur En Relève d'une CHaudièrE), promu par EDF, où une pompe à chaleur était couplée avec la chaudière à fuel existante. Le chauffage central était alors bien développé et la pompe à chaleur pouvait logiquement y trouver sa place.

Qu'est-ce qui a conduit à l'échec le chauffage par pompe à chaleur à cette époque ?

La première et principale cause provient du fait que les habitations étaient très insuffisamment isolées. C'est d'ailleurs pour cette même raison que les planchers chauffants de première génération (haute température) ont subi le même revers…

Une habitation très bien isolée ne nécessite qu'une faible puissance pour être confortablement chauffée. Il en découle que la température des éléments apportant la puissance de chauffage peut être abaissée. C'est le cas des planchers chauffants actuels basse température.

Une seconde cause d'échec, mais qui reste attachée à la première, était due aux performances médiocres du matériel de

l'époque : les éléments utilisés provenant de l'industrie du froid n'étaient pas optimisés pour le chauffage individuel.

À présent, les compresseurs ont fait des progrès significatifs et tendent à mieux s'adapter au besoin de chauffage de l'habitat. Leurs points de fonctionnement actuels sont moins contraignants (températures et pressions plus basses) et la fiabilité s'améliore.

La troisième raison de l'abandon du chauffage par pompe à chaleur incombait au prix global de l'installation et à sa complexité : une pompe à chaleur air/eau couplée avec une chaudière fuel en relève pour les périodes les plus froides transformaient les locaux chaufferies en véritables « usines à gaz » !

Enfin, dernières hypothèses à nos yeux : les énergies fossiles n'étaient-elles encore pas suffisamment chères ? Les considérations écologiques réservées à quelques illuminés ?

Pourtant, nous connaissons des installations ayant maintenant 25 ans qui fonctionnent encore parfaitement, sans aucun entretien onéreux particulier. Elles sont souvent le fruit de « bricoleurs » géniaux et avant-gardistes qui avaient résolu au moins une partie des points bloquants évoqués ci-dessus.

Les figures ci-contre comparent deux machines : quelle différence d'encombrement pour ces deux pompes à chaleur qui fournissent la même puissance ! La doyenne n'a qu'un COP de 3 tandis que la machine récente atteint 4.





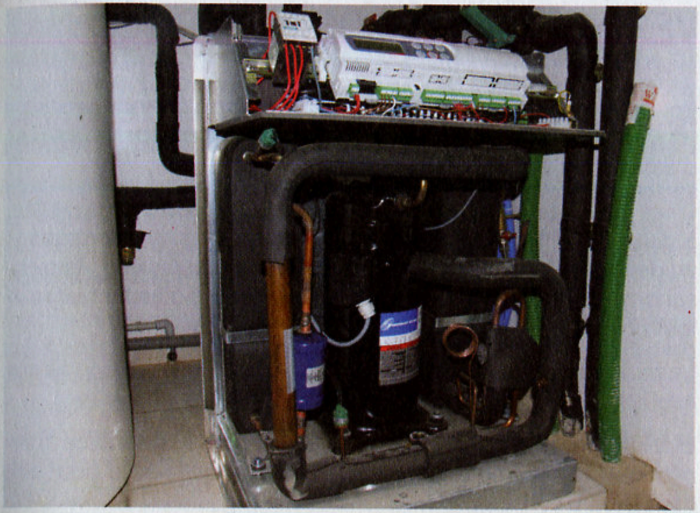




*Fig. A – Pompe à chaleur eau/eau de 1981 comparée à une machine de 2005, eau glycolée/eau.*

# VERS UNE PHASE DE MATURITÉ

Pourquoi aujourd'hui le chauffage par pompe à chaleur connaît-il un véritable engouement ? Parce que les principales causes d'échecs ont été éliminées.

C'est probablement grâce à l'électricité, et à son prix supérieur à celui des énergies fossiles, que les maisons ont commencé au début des années 1980 à être correctement isolées : la puissance nécessaire au chauffage a pu baisser, les planchers chauffants basse température ont fait leur apparition.

La température des corps chauffants a baissé en même temps que la puissance par unité de volume habitable.

L'isolation des maisons, qui se mesure par la résistance thermique (Rth) s'est nettement améliorée. Rth est élevée pour une habitation bien isolée.

Pour chauffer une habitation, il faut une puissance :

$P = (T_{extérieur} - T_{intérieur})/Rth$.

Où P est la puissance fournie par le chauffage en Watts (W),

$T_{extérieur}$ est la température extérieure en °C

$T_{intérieur}$ est la température intérieure en °C

Rth est la résistance thermique en Kelvin/Watt (K/W).

Donc, une meilleure isolation (Rth grand) fait baisser la puissance nécessaire pour la chauffer (P plus petit).

Les éléments chauffants présentent eux aussi une résistance thermique notée $Rth_{source}$. Plus cette valeur est faible, meilleur est l'échange thermique avec l'air ambiant.

Les sources de chaleur dissipent une puissance :

$P = (T_{source} - T_{intérieur})/Rth_{source}$.

Pour une température intérieure et un corps de chauffe donnés, la température de la source diminue si sa puissance diminue.





Ainsi, si l'élément chauffant présente une très faible résistance thermique ($Rth_{source}$), sa température pourra être très proche de la température ambiante. C'est le cas des planchers chauffants basse température ou des murs chauffants grâce à leurs très grandes surfaces d'échange.

Nous verrons plus loin que l'abaissement de la température des éléments chauffants (planchers chauffants, murs chauffants, radiateurs à grande surface d'échange) améliore le rendement des pompes à chaleur.

Les composants constituant une pompe à chaleur ont évolué pour mieux s'adapter au besoin en chauffage de l'habitat. Parmi ces composants, les compresseurs voient apparaître une nouvelle technologie (Scroll) qui permet d'obtenir de meilleures performances. Les modèles alimentés en 230 V monophasé grimpent en puissance.

Les échangeurs à plaques, très compacts et efficaces, remplacent avantageusement les anciens modèles coaxiaux encombrants.

L'idée de puiser des calories directement dans la terre plutôt que dans l'air a permis d'avoir des conditions de fonctionnement moins contraignantes. Cette considération sera largement développée par la suite.

Les pompes à chaleur actuelles permettent selon leur adaptation à l'habitation, de couvrir la totalité des besoins en chauffage. Pour les cas difficiles (maison ancienne mal isolée par exemple), une résistance électrique d'appoint compensera le manque de puissance pour les périodes les plus froides. Le surcoût d'investissement pour cette résistance est négligeable.

Bien que de haute technologie, les éléments constituant une pompe à chaleur ont un coût très raisonnable. Une installation de ce type ne devrait en théorie pas revenir plus cher à l'achat qu'un chauffage au gaz ou au fuel. Ajoutons qu'une installation faite selon les règles de l'art ne nécessite aucun entretien (ce qui procure une économie non négligeable) et ne présente ni dangers, tel les risques d'incendie, d'explosion, d'asphyxie, ni désagréments (mauvaises odeurs, poussières, suies...).

L'augmentation permanente du prix des énergies fossiles pousse nos compatriotes à réétudier le budget familial. La question : « Peut-on utiliser une pompe à chaleur dans notre cas ? » revient régulièrement sur les forums de discussion, que ce soit pour des installations neuves ou pour du remplacement. Les aides de l'État favorisent aussi la demande de renseignements de la part d'acquéreurs potentiels. De ce fait, de nombreuses personnes franchiront le pas.

L'aspect écologique de ce mode de chauffage motive les personnes engagées pour l'amélioration de notre environnement.

De 1980 à 1990, seuls les propriétaires qui possédaient une source, un puits ou une nappe phréatique facilement exploitables bénéficiaient parfois d'un chauffage par pompe à chaleur (de type eau/eau).

Entre 1990 et 1995, les maisons équipées de pompes à chaleur de type sol/sol ont commencé à apparaître, principalement en Bretagne et en région Rhône-Alpes.

En France, depuis environ 5 ans, le marché de la pompe à chaleur pour le chauffage est en croissance de 30 à 40 % par an. En 2005, on évalue à 50 000 le nombre de foyers équipés.

## QUELLES SONT LES NOUVEAUTÉS ?

La recherche de nouveaux fluides frigorigènes est permanente, avec pour objectif principal d'améliorer leur innocuité pour l'environnement. De nouveaux réfrigérants apparaissent donc régulièrement. Ils s'adaptent aussi aux besoins spécifiques du marché : compacité des machines frigorifiques, haut niveau de performance, fonctionnement sans huile, etc.

Ainsi, par exemple, le CFC R12, très destructeur pour la couche d'ozone, est remplacé par le HFC R134a, et le HCFC R22 est remplacé par le HFC R407C. Le R410A fait son apparition. Il s'ensuit des répercussions sur les compresseurs telles que le changement de cylindrée à puissance égale, le changement du type d'huile.





Le problème de l'influence de ces gaz sur l'effet de serre reste préoccupant : peut-on appeler (commercialement bien sûr) « fluide vert » un réfrigérant qui induit 1 700 fois plus d'effet de serre que le $CO_2$ (gaz carbonique) ?

Le HC R290 (gaz propane) pourrait apporter une véritable réponse écologique mais les risques quant à son utilisation généralisée devront être maîtrisés. Actuellement, des pompes à chaleur installées en extérieur avec de faibles charges (1 à 2 kg) sont commercialisées en France et à l'étranger. Nous imaginons aussi que des pompes à chaleur sol/eau placées à l'extérieur de l'habitation pourraient être chargées en usine de plusieurs kilos de R290. Pourquoi le risque serait-il supérieur à celui du stockage extérieur de bouteilles de 13 kg de propane pour la cuisinière ?

Si nous suivons la tendance actuelle, qui élimine petit à petit les réfrigérants les moins écologiques, nous ne pouvons raisonnablement plus accepter le concept des pompes à chaleur avec le condenseur noyé dans la dalle. Quel utilisateur acceptera de remplacer son R407C ou R404A (ininflammable) par une quinzaine de kilos de propane ? De toute façon, cela serait interdit !

Des études sont aussi menées pour diminuer au maximum la quantité de fluide frigorigène, en optimisant le volume et la qualité des échangeurs : par exemple, en laboratoire, il est actuellement possible d'obtenir une puissance thermique de 1 kW avec moins de 100 grammes de réfrigérant.

À terme, toutes les installations comportant un important volume de réfrigérant nuisible pour l'environnement devraient être soumises à des contrôles périodiques, afin de déceler d'éventuelles fuites. Le coût et les contraintes de ces vérifications contribueront à promouvoir les pompes à chaleur fonctionnant avec des fluides frigorigènes réellement écologiques et sans frais d'entretien.

Les systèmes de variation de puissance sont aussi la cible des recherches actuelles. Soit par variation de vitesse du compresseur, soit par le Digital Scroll développé par la société Copeland.

Dans ces deux cas, les échangeurs fonctionnent dans de meilleures conditions et des économies d'énergie en découlent.

Grâce aux réglementations thermiques, l'isolation des habitations est de mieux en mieux maîtrisée. La tendance va donc vers une baisse de la puissance de chauffage. Malheureusement, les compresseurs pour pompes à chaleur de petite puissance sont moins efficaces que ceux de plus forte puissance. Cela est dû au fait que le rendement des moteurs asynchrones (les plus utilisés actuellement dans les compresseurs) baisse en même temps que leur puissance. Par exemple, des moteurs asynchrones (triphasés) de 10 à 15 kW atteignent des rendements proches de 90 % tandis que des moteurs asynchrones (monophasés) de quelques centaines de Watts possèdent des rendements d'à peine 60 %.

Un fabricant danois propose des petits compresseurs (à pistons) dont les moteurs à aimants permanents sont pilotés électroniquement (certains modèles peuvent même être alimentés en 12 V ou 24 V continu). Plusieurs constructeurs asiatiques fabriquent des compresseurs Scroll et aussi de types rotatifs (y compris de petites puissances), également équipés de moteurs à aimants permanents avec contrôle électronique (technologie avec un onduleur dit « DC inverter »). Ces compresseurs sont actuellement utilisés dans les petits climatiseurs. La nouveauté consistera à construire des pompes à chaleur de très faible puissance avec une efficacité très intéressante grâce au bon rendement du moteur (jusqu'à 90 %, électronique comprise). De surcroît, ces moteurs peuvent tourner à vitesse variable, ce qui permet de moduler la puissance du compresseur.

Le marché de la rénovation profite aussi des évolutions technologiques : le remplacement des chaudières à combustion par des pompes à chaleur haute température à cycle EVI devrait, dans le futur, se généraliser aux installations équipées de radiateurs anciens fonctionnant à haute température (> 60 °C).

Pour un avenir un peu plus lointain, les pompes à chaleur magnétiques pourraient évincer les machines thermodynamiques, grâce à des performances spectaculaires : COP > 6 ! Ici, c'est la magnétisation et la démagnétisation alternative d'un cristal à base





de terres rares qui créent respectivement un dégagement de chaleur et une absorption de chaleur. La gestion des flux calorifiques du cristal vers des échangeurs permet ainsi de transférer des calories d'une source froide vers une source chaude et réciproquement.

## QUEL AVENIR POUR LE MARCHÉ DES POMPES À CHALEUR ?

La croissance du marché des pompes à chaleur restera sans doute soutenue pendant encore plusieurs années. Après l'habitat individuel neuf, de nombreuses installations devraient voir le jour pour la rénovation (principalement avec source froide air ou eau glycolée en forages profonds et source chaude air ou eau pour radiateurs).

Ce mode de chauffage pourra aussi conquérir les petits logements collectifs. Nous pensons que, par ce marché important, les pompes à chaleur eau glycolée/eau sur forages verticaux s'imposeront tandis que les pompes à chaleur eau/eau trouveront logiquement leur place à chaque fois qu'une nappe phréatique sera accessible. Contrairement à la tendance actuelle, le chauffage des appartements risquerait de redevenir collectif ! À moins de mutualiser la source froide...

Les grands groupes du génie climatique commencent à diversifier leurs offres vers le chauffage, soit simplement grâce à la réversibilité des climatiseurs, soit avec de nouvelles fabrications de pompes à chaleur.

À l'avenir, la production de masse de pompes à chaleur pourrait appartenir à quelques grandes entreprises dans le monde. La fabrication des machines deviendrait plus industrielle, ce qui devrait homogénéiser leurs performances et leur fiabilité, mais cela peut-être au détriment de l'innovation et surtout des réalisations « sur mesure ».

PARTIE 1

# COMMENT FONCTIONNE UNE POMPE À CHALEUR ?

# 1 Principales composantes d'une pompe à chaleur

Le principe est bien décrit dans son appellation : elle pompe de la chaleur !

Une pompe à chaleur est capable d'extraire des calories (donc de l'énergie) à un milieu « froid » pour les restituer à un autre milieu à une température plus élevée. Ces milieux sont appelés respectivement « source froide » et « source chaude ». Pour prendre des calories à un milieu froid, il suffit de le refroidir d'avantage. Pour restituer ces calories à un milieu chaud, il convient de le réchauffer. Cette opération se fait grâce à un fluide qui présente la particularité de changer d'état (liquide ou gazeux) quand on modifie sa pression. Le liquide tend à bouillir quand sa pression baisse et le gaz tend à se condenser quand on augmente sa pression. Paradoxalement, le liquide bout à des températures négatives tout en produisant un froid intense. La condensation du gaz s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur. L'énergie à dépenser est celle nécessaire à un compresseur qui effectue l'augmentation de pression du gaz. L'intérêt du principe est séduisant car une faible quantité d'énergie fournie au compresseur permet de transférer une grande quantité de chaleur de la source froide à destination de la source chaude. L'utilisateur paie donc l'énergie nécessaire au fonctionnement du compresseur et la récupère intégralement, additionnée de celle prélevée gratuitement à la source froide (air, eau, terre, etc.). Nous appelons « coefficient de performance (COP) » le rapport de l'énergie totale obtenue sur l'énergie dépensée. Les performances des





pompes à chaleur varient considérablement en fonction de l'écart de température entre la source froide et la source chaude. Un grand écart de température dégrade la performance, COP = 2 par exemple. Inversement, un faible écart permet une excellente performance, COP = 5 par exemple. Remarquons qu'un chauffage électrique a un COP de 1.

**FORMULE THÉORIQUE**

Les lois de la thermodynamique donnent un rendement de Carnot ou coefficient de performance théorique maximal pour une pompe à chaleur idéale tel que défini ci-dessous :

$COP_{Carnot} = T_{source\ chaude}/(T_{source\ chaude} - T_{source\ froide})$

Où $T_{source\ chaude}$ et $T_{source\ froide}$ sont des températures absolues exprimées en Kelvin.

Exemple : $T_{source\ chaude} = 313$ K ; $T_{source\ froide} = 263$ K

$COP_{Carnot} = 313/(313 - 263) = 6{,}26$.

**TERMINOLOGIE**

$P_{mécanique}$ : puissance mécanique fournie par le compresseur

$P_{électrique}$ : puissance électrique consommée

$P_{frigorifique}$ : puissance frigorifique extraite

$P_{thermique}$ : puissance thermique restituée

COP : coefficient de performance (dans cet ouvrage traitant du chauffage, nous ne parlerons que du COP « côté chaud » contrairement aux frigoristes qui évoquent habituellement le COP « frigo », appelé EER).

$P_{thermique} = P_{frigorifique} + P_{électrique}$

$COP = P_{thermique}/P_{électrique}$

Pour « pomper de la chaleur » à la source froide et lui faire monter l'échelle des températures, il convient de faire circuler un fluide (appelé fluide frigorigène ou réfrigérant) dans un circuit fermé. Ce circuit (appelé circuit frigorifique) parcourt la source froide où règne une basse pression et la source chaude sous haute pression où le fluide cède de la chaleur à haute température.

Les caractéristiques de changement d'état (liquide/gaz) du fluide frigorigène sont choisies suivant les températures et les pressions de fonctionnement de la pompe à chaleur. Par exemple, à la pression atmosphérique, le réfrigérant bout (s'évapore) à – 25 °C. En dessous de cette température, il reste liquide. Confiné dans sa bouteille à 20 °C, ce même fluide frigorigène sera liquide, avec un ciel de gaz sous une pression d'environ 6 bars (pression qui dépend du type de fluide). Comme nous le verrons ci-dessous, les changements de pression du réfrigérant, qui constituent le principe même de la pompe à chaleur, vont entraîner des changements de phase (d'état), de température, et donc des échanges de calories.

## LES QUATRE PRINCIPAUX ÉLÉMENTS DU CIRCUIT

Le compresseur comprime le fluide frigorigène (dans sa phase gazeuse), ce qui a pour effet de l'échauffer. Les principales technologies sont les compresseurs à pistons, les compresseurs rotatifs, et les compresseurs Scroll. Ces derniers, composés de deux spirales animées par un excentrique, envahissent littéralement le marché. Pour les pompes à chaleur de petites ou moyennes puissances qui nous intéressent dans cet ouvrage, tous les compresseurs sont dits hermétiques. Le fluide est confiné dans une enceinte qui comprend le compresseur lui-même, le moteur et l'huile nécessaire à la lubrification. Seuls les conducteurs électriques sortent vers l'extérieur par un bornier étanche. Une expérience très simple permet de bien comprendre le rôle du compresseur : gonflez un pneu de vélo et vous constaterez que l'air comprimé échauffe le corps de la pompe.





Le condenseur met en contact thermique le fluide frigorigène avec la source chaude capable de récupérer les calories à haute température. Pendant cette opération, le fluide se condense.

L'organe de détente (détendeur thermostatique ou capillaire) abaisse la pression du fluide liquide. Cette phase provoque une chute de température du fluide et un début de vaporisation. Le détendeur thermostatique est composé d'un orifice dont le diamètre est ajusté par un asservissement. Grâce à un bulbe qui mesure par contact la température du gaz aspiré par le compresseur, l'asservissement règle l'orifice du détendeur, afin d'injecter le bon débit de fluide frigorigène dans l'évaporateur. Dans le cas d'une détente par capillaire, la quantité de fluide injectée reste non réglable. Il en résulte une plage de température de fonctionnement de la pompe à chaleur restreinte. C'est le cas de la production de froid dans l'électroménager. Une expérience facile à faire permet de reproduire la détente d'un fluide : constatez le refroidissement de la cartouche d'un aérosol lorsque vous pulvérisez pendant un long moment. Cela est dû à la chute de pression dans le récipient.

L'évaporateur met en contact thermique le fluide frigorigène avec la source froide capable de céder les calories à basse température. Pendant cette opération, le fluide bout et s'évapore.

Le condenseur et l'évaporateur sont des échangeurs thermiques. Ils peuvent échanger des calories entre le fluide frigorigène et de l'eau. Les échangeurs peuvent être coaxiaux : l'eau circule dans un tube de cuivre de grand diamètre et le fluide circule à contre-courant dans plusieurs petits tubes noyés dans le gros tube. Il existe aussi des échangeurs à plaques. L'eau et le fluide frigorigène circulent à contre-courant de chaque côté de nombreuses plaques en inox (un peu comme un mille-feuilles !). Cette technologie récente permet un échange excellent avec une différence de température très faible entre les deux fluides.

Les condenseurs et les évaporateurs peuvent aussi échanger les calories avec l'air. Un tube dans lequel circule le fluide frigorigène traverse de nombreuses ailettes, généralement en aluminium. Ces échangeurs existent soit ventilés (les ailettes sont

très rapprochées), soit en convection naturelle (les ailettes sont espacées).

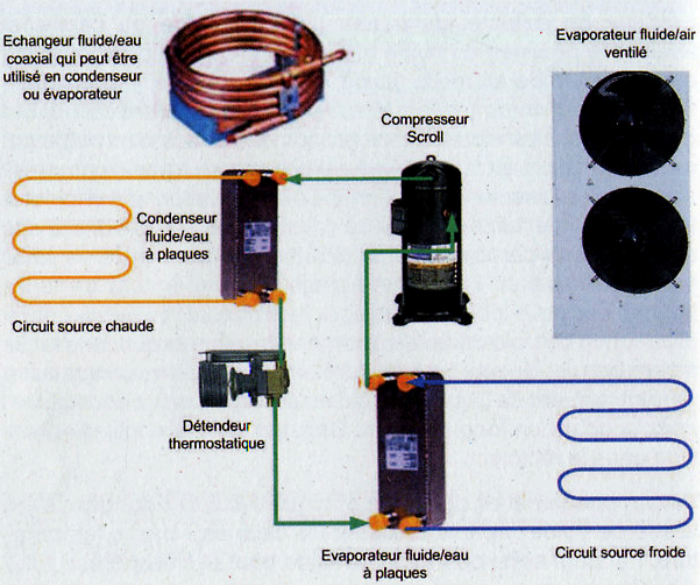



*Fig. 1.1 – Dessins des 4 éléments*

## PARCOURS DU FLUIDE FRIGORIGÈNE EN PARTANT DU COMPRESSEUR

Le gaz est comprimé et de ce fait s'échauffe (valeur à titre d'exemple sur le schéma : 90 °C mais qui dépend du type de fluide frigorigène).

Sorti du compresseur, le gaz arrive dans le condenseur. Là, il rencontre à travers cet échangeur la source chaude, plus froide que lui, ce qui provoque tout d'abord sa désurchauffe (de 90 °C





vers 45 °C par exemple), puis sa liquéfaction. La désurchauffe du gaz restitue entre 10 et 15 % de l'énergie totale échangée dans le condenseur. Au cours du changement d'état, le fluide frigorigène va céder des calories à température constante (45 °C dans l'exemple). Une fois entièrement liquide, le fluide peut être encore légèrement sous-refroidi (de 45 °C à 40 °C par exemple). Dans le cas où l'échangeur avec la source chaude est largement dimensionné, le média qui le traverse sortira à une température très proche de celle de la condensation du fluide frigorigène (43 °C par exemple). Le fluide sous-refroidi peut sortir plus froid que le média car la circulation se fait toujours à contre-courant. Toute cette partie du circuit frigorifique est réalisée en tube de cuivre de diamètre relativement petit (par exemple $^1/_2$ pouce soit 12,7 mm).

Le fluide frigorigène liquide passe par un « étranglement » qui se présente soit sous la forme d'un simple capillaire (tube de très petit diamètre calibré en longueur), soit plus sophistiquée, d'un détendeur thermostatique. En amont de cet organe de retenue, le fluide frigorigène se trouve à haute pression (12 bars par exemple), en aval à basse pression (2 bars par exemple). Cette chute de pression provoque une baisse de température brutale du fluide frigorigène et une vaporisation partielle.

La sortie du détendeur débouche, soit directement sur un évaporateur simple, soit sur un distributeur de liquide qui répartit le fluide équitablement dans plusieurs tubes d'un évaporateur conséquent.

À ce stade, le fluide frigorigène est composé d'une sorte de brouillard riche en gouttelettes. Le rôle de l'évaporateur consiste à obtenir exclusivement du gaz en faisant bouillir le fluide au contact de la source froide. En s'évaporant, le fluide frigorigène capte des calories à travers l'évaporateur. Ici aussi, la source froide peut être un média tel que l'eau ou l'air. La fin du parcours dans l'évaporateur doit servir à surchauffer le gaz de manière à être certain que tout le fluide est évaporé. Par exemple, si la température d'évaporation est de – 10 °C, les gaz doivent être surchauffés jusqu'à – 3 °C. Le fluide frigorigène et le média circulent à contre-courant comme dans le condenseur.

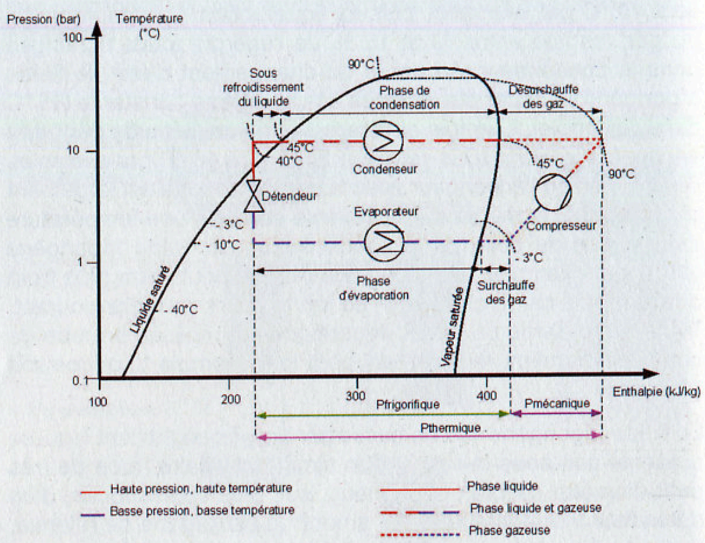



*Fig. 1.2 – Dessin du cycle thermodynamique idéal sur le diagramme de Mollier*

En sortie de l'évaporateur, le gaz est aspiré par le compresseur et le cycle se poursuit… La surchauffe à l'évaporation assure le compresseur de ne pas aspirer du liquide, ce qui risquerait de l'endommager gravement. La partie aspiration du compresseur est réalisée avec du tube de cuivre de diamètre relativement important pour limiter les pertes de charges (par exemple $^{3}/_{4}$ pouce soit 19 mm).

La figure 1.3 représente une pompe à chaleur fonctionnant vers – 15 °C de température d'évaporation et + 55 °C de température de condensation (cas, par exemple, d'une installation air/eau sur radiateurs par température extérieure extrême). Ce point de fonctionnement conduit à un $COP_{théorique}$ très mauvais, inférieur à 2, et donc à un $COP_{réel}$ à peine supérieur à 1 ! (autant utiliser une résistance électrique…).





## LE CYCLE THERMODYNAMIQUE IDÉAL

**Le diagramme de Mollier, qui permet de suivre le cycle thermodynamique d'une machine frigorifique, est établi en enthalpies (une variation d'enthalpie fournit une énergie) en abscisses, et en pressions en ordonnées. Une courbe en cloche définit l'état du fluide frigorigène : complètement liquide à gauche de la ligne de liquide saturé, complètement gazeux à droite de la ligne de vapeurs saturées. Entre les deux, liquide et vapeurs coexistent et les isothermes sont horizontales (pour les fluides dits « azéotropiques » se comportant comme des corps purs). Les échanges de chaleur se font donc à température constante à l'intérieur de la courbe en cloche. Les températures et les pressions sont alors rigoureusement proportionnelles. À gauche de la ligne de liquide saturé, les isothermes montent brusquement, tandis qu'à droite de la ligne de vapeurs saturées, elles descendent rapidement. Ces courbes correspondent à des changements de températures sans changement d'état.**

**Le coefficient de performance théorique s'évalue sur ce diagramme :**

$COP_{théorique} = P_{thermique}/P_{mécanique}$.

**Attention, il s'agit d'un $COP_{théorique}$ qui ne tient pas compte des nombreuses pertes telles que celles liées aux rendements du moteur, du compresseur et les pertes de charges dans les éléments du circuit frigorifique. Le rapport entre le $COP_{théorique}$ et le $COP_{réel}$ est voisin de 0,75. Cette valeur correspond approximativement au rendement du moteur et du compresseur, les autres pertes étant minoritaires. Avec des moteurs à hauts rendements il est possible de s'approcher sensiblement du $COP_{théorique}$. Le gain est surtout significatif pour les compresseurs de petites puissances alimentés en monophasé (puissance électrique < 1 000 W). Grâce au diagramme de Mollier, nous comprenons que plus l'écart entre pression de condensation et pression d'évaporation est grand, moins bon est le COP.**

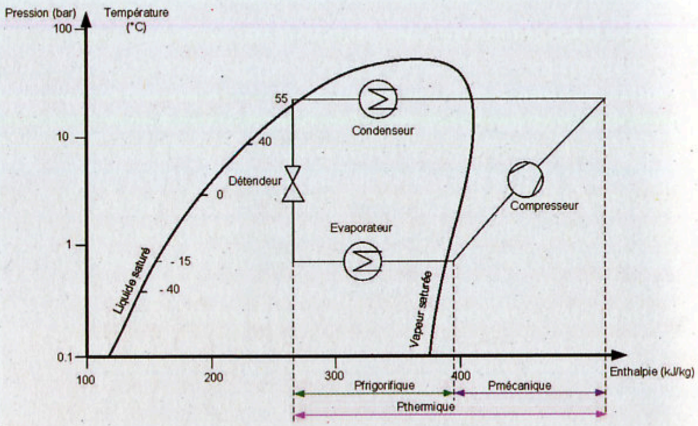



*Fig. 1.3 – Dessin simplifié du diagramme de Mollier pour une pompe à chaleur fonctionnant de – 15 à + 55 °C*

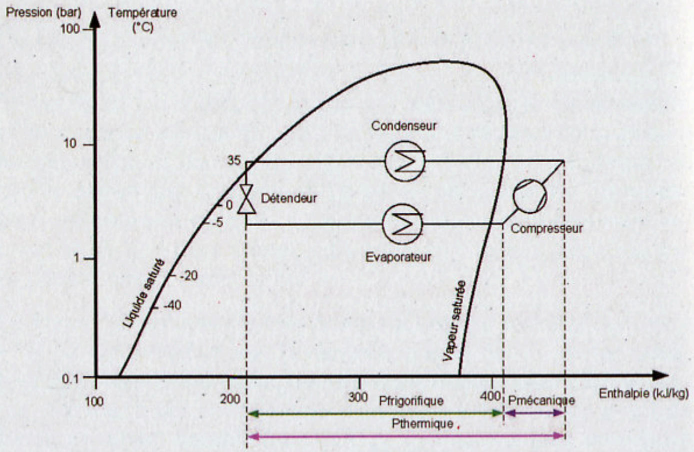



*Fig. 1.4 – Dessin simplifié du diagramme de Mollier pour une pompe à chaleur fonctionnant de – 5 à + 35 °C*





Au contraire, la figure 1.4 correspond au fonctionnement d'une pompe à chaleur vers – 5 °C pour la température d'évaporation et + 35 °C pour la condensation (cas, par exemple, d'une installation eau glycolée/eau), qui conduit à un $COP_{théorique}$ d'environ 5 et donc à un $COP_{réel}$ voisin de 3,8.

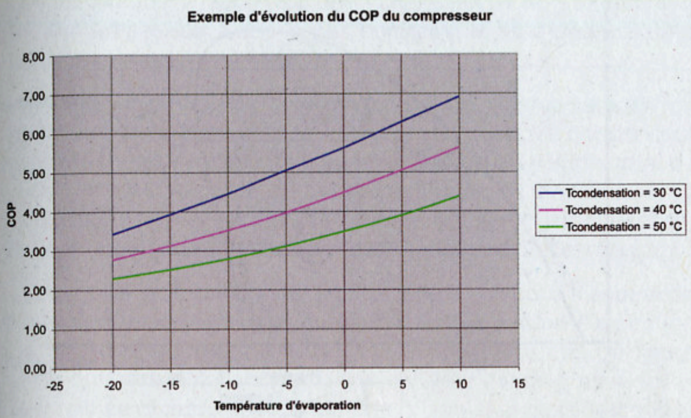



*Fig. 1.5 – Exemple d'évolution du COP*

La température maximum de fonctionnement des compresseurs est limitée par la tenue thermique des différentes pièces en contact avec les gaz comprimés ainsi que par l'huile de lubrification : 115 °C à 125 °C généralement selon les constructeurs. Or, ces valeurs sont atteintes pour une température de condensation bien inférieure (55 à 65 °C selon les fluides et selon la pression d'évaporation). La température des gaz refoulés par le compresseur dépend aussi de la température des gaz aspirés : une aspiration à température élevée (par exemple 25 °C) conduit à un refoulement à température élevée. Une innovation récente sur les compresseurs Scroll permet de travailler à plus haute pression de condensation : le principe consiste à prélever une petite partie du réfrigérant liquide (en sortie du condenseur), à le détendre et à l'injecter au milieu des spirales du compresseur Scroll. Ce brouillard vient refroidir efficacement les gaz surchauffés en sortie du compresseur sans abaisser pour autant

la pression de condensation. Ainsi le compresseur fonctionne à une température de condensation plus élevée sans être limité par les gaz surchauffés en sortie et le COP est amélioré (+ 13 %).

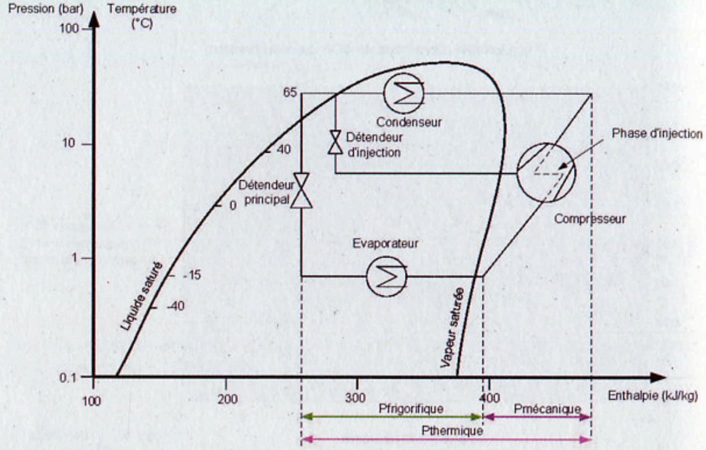



*Fig. 1.6 – Diagramme de Mollier EVI*

Les quelques fabricants qui maîtrisent cette technologie (appelée EVI), la proposent généralement pour des pompes à chaleur air/eau bien adaptées au marché de la rénovation grâce à la température élevée de sortie d'eau (65 à 70 °C).

# LES ÉLÉMENTS ANNEXES D'UNE POMPE À CHALEUR

En plus des quatre éléments fondamentaux décrits ci-dessus, d'autres composants viennent fiabiliser et sécuriser le circuit frigorifique.

Un filtre déshydrateur prend place en série avec un voyant de liquide en amont de l'organe de détente. Le voyant permet de





contrôler visuellement la charge correcte en fluide frigorigène et son état d'hygrométrie. Pour bien visualiser le passage du réfrigérant et les éventuelles bulles, il se monte idéalement sur une conduite verticale. Le filtre déshydrateur maintient le fluide propre et sec. Le témoin d'hygrométrie du voyant doit impérativement indiquer « sec » sur une installation pr te à fonctionner ou déjà en service. Dans le cas contraire, le filtre déshydrateur doit être changé.

Une réserve de liquide peut venir faire un volume tampon en sortie de condenseur. Elle est utile surtout quand le condenseur contient un petit volume de fluide par rapport au volume total de l'installation. Une partie du fluide frigorigène se stocke au fond de cette réserve et permet d'alimenter régulièrement et exclusivement le détendeur en liquide (pas de risques de flashes gaz).

La bouteille anti-coups de liquide prend place à l'aspiration du compresseur. Elle prot ge ce dernier en évitant l'aspiration d'éventuelles gouttes de fluide non évaporé. Ce cas de figure existe dans les installations où l'évaporateur est de grande taille, avec une surchauffe difficilement maîtrisable, et aussi lorsque la détente est confiée à un capillaire.

La lubrification des compresseurs hermétiques se fait par bain d'huile au fond de la cuve. Une partie de l'huile part dans le circuit avec le fluide frigorigène. La bouteille anti-coups de liquide est conçue pour permettre le retour de l'huile au compresseur.

Selon le circuit frigorifique (faible charge de fluide, détente thermostatique, échangeur supplémentaire surchauffeur), il est possible de ne pas mettre de bouteille anticoups de liquide. Les compresseurs Scroll tolèrent les coups de liquide tandis que ceux à piston ou rotatifs y sont très sensibles (important risque de casse). Pendant les arrêts d'une pompe à chaleur et en fonction des températures et des hauteurs des différents éléments, le réfrigérant peut migrer et venir se condenser vers l'aspiration du compresseur. Sans précaution, au redémarrage, c'est le coup de liquide assuré pour le compresseur. Pour éviter cela, une électrovanne prend place sur la ligne liquide, c'est-à-dire juste avant l'organe de détente. Cette électrovanne est commandée en même temps que le compresseur.

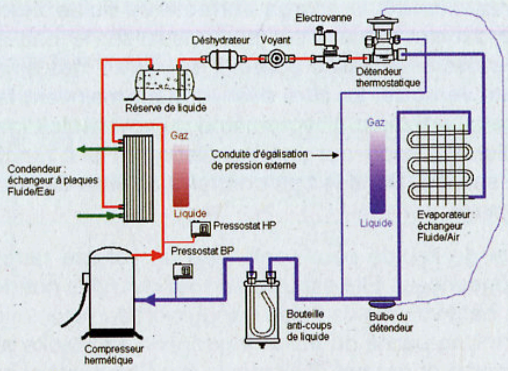



*Fig. 1.7 – Exemple de schéma synoptique d'une pompe à chaleur air/eau*

Le pressostat haute pression (HP) déclenche l'arrêt du compresseur en cas de pression anormale en sortie. C'est le cas, par exemple, si le détendeur thermostatique est bouché accidentellement. La sécurité basse pression (BP) intervient, entre autres, s'il y a perte importante de fluide frigorigène : le compresseur a tendance à tirer au vide l'évaporateur. Il faut donc arrêter son fonctionnement.

## QUEL FLUIDE FRIGORIGÈNE POUR QUELLE APPLICATION ?

Le R134a est un HFC (hydrofluorocarbure) qui remplace le R12 (CFC : chlorofluorocarbure) à présent interdit car très destructeur de la couche d'ozone. Le R134a est utilisé en quantité pour les climatisations automobiles. Dans l'habitat, il présente l'intérêt de faire fonctionner les pompes à chaleur à haute température (généralement jusqu'à 65 °C). C'est l'application idéale pour une production d'eau chaude pour radiateurs en remplacement d'une ancienne chaudière. Ce réfrigérant fonctionne à pression relativement basse.





Le R407C (HFC) remplace le R22 (HCFC : hydrochlorofluorocarbure) qui était encore récemment massivement utilisé dans la climatisation et les pompes à chaleur (température d'utilisation courante : jusqu'à 55 °C). Le R22 présente l'inconvénient d'appauvrir légèrement la couche d'ozone (environ 25 fois moins que le R12 qui est choisi comme référence car très destructeur). La plupart des pompes à chaleur actuelles fonctionnent au R407C avec les mêmes compresseurs que ceux qui utilisaient le R22. Seule l'huile change. Le R407C présente des particularités et des inconvénients propres aux mélanges de gaz :

- Lors des changements de phases, la température « glisse » de 5 K environ ce qui rend les réglages plus difficiles et impose des échangeurs à contre-courant pour tirer le meilleur partiède ce fluide (c'est un mélange non azéotropique).
- Ce réfrigérant étant un mélange de gaz, en cas de micro-fuite, le composé ayant les molécules les plus volatiles s'échappe préférentiellement. Il en résulte un fluide frigorigène déséquilibré avec la nécessité de vider complètement l'installation avant de la recharger. Le reliquat de gaz retiré doit être récupéré pour recyclage.

Le R410A (HFC) est lui aussi un mélange mais il change d'état à température quasi constante. Il est de plus en plus utilisé dans les climatisations air/air. C'est un fluide qui travaille à haute pression ce qui limite son usage aux températures de condensation moyennes (jusqu'à 45 °C environ). Ses qualités de transfert thermique permettent de diminuer l'encombrement des échangeurs et donc d'avoir des pompes à chaleur très compactes avec un COP intéressant.

Le R404A (HFC) présente des caractéristiques communes avec le R410A hormis sa pression de fonctionnement plus basse (proche du R22). Ce réfrigérant comporte en outre la particularité de peu s'échauffer pendant la phase de compression. La température des vapeurs surchauffées en sortie de compresseur reste donc modérée ce qui convient parfaitement à l'application des pompes à chaleur SOL/SOL.

Le R417A (HFC) est actuellement peu utilisé, pourtant il présente l'avantage par rapport aux autres HFC de pouvoir fonctionner avec une huile classique (minérale). Hélas, comme le R407C, il est non azéotropique avec un glissement en température important. Dans certaines applications, il peut remplacer le R22 sans modification.

Le R290 (HC : hydrocarbure) est tout simplement du gaz propane. Ses caractéristiques en font un fluide frigorigène intéressant et très proche du R22. Hélas ses propriétés d'inflammabilité le cantonnent actuellement à l'extérieur des habitations et en faible quantité. Il est compatible avec tous types d'huiles.

**ATTENTION À L'HUILE SYNTHÉTIQUE !**

**L'inconvénient commun à tous les HFC est lié à l'huile synthétique (polyolester) qu'ils exigent (hormis le R417A). Ce type d'huile est extrêmement sensible à l'humidité qu'elle absorbe en un temps record ! Une fois saturée en eau, l'huile n'assure plus correctement sa fonction lubrifiante et de plus il y a, par réaction chimique, formation d'acides susceptibles de corroder tout le circuit frigorifique. Les contraintes que représente l'usage des HFC impliquent un soin encore accru de la part des fabricants et des installateurs, lors de la réalisation des circuits frigorifiques.**

### Impact des fluides frigorigènes sur l'environnement

La nuisance atmosphérique des réfrigérants est de 2 types :

- Destruction de la couche d'ozone.
- Contribution à l'effet de serre.

Dans le tableau suivant nous noterons par des moins (-) l'intensité des nuisances et par (0) l'innocuité (ou quasi-innocuité) vis à vis de l'atmosphère.





| Fluide | R12 | R22 | R134a | R407C | R410A | R404A | R417A | R290 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ozone | --- | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Effet de serre | -- | -- | - | -- | --- | --- | --- | 0 |

Pour donner un ordre de grandeur, 1 kg de R410A lâché dans l'atmosphère produit autant d'effet de serre que le $CO_2$ (gaz carbonique) rejeté par une voiture moyenne qui parcourt 10 000 km. Gardons à l'esprit qu'une pompe à chaleur en bon état ne « consomme » pas de fluide frigorigène. Les fuites sont accidentelles.

# 2 Où puiser des calories ?

Autrement dit, pour une application chauffage de l'habitat, quelle source froide choisir ?

L'air et l'eau sont les éléments les plus conventionnellement utilisés. La terre et/ou la pierre présentent un intérêt indéniable.

## PUISAGE DES CALORIES DANS L'AIR (AÉROTHERMIE)

La récupération des calories dans l'air présente l'avantage de nécessiter une mise en œuvre simple et sans aléas : la ressource est toujours disponible. L'évaporateur se présente sous forme d'un simple échangeur à air ventilé. Il ressemble au radiateur d'une automobile, l'antigel étant remplacé par le fluide frigorigène. Hélas, l'air présente une très faible densité et fait partie des meilleurs isolants connus. Par conséquent, il faut brasser une énorme quantité d'air pour retirer suffisamment de calories. De par sa faible inertie, il suit instantanément les conditions climatiques. Concr tement, en dessous d'une température extérieure d'environ + 5°C, la performance des pompes à chaleur à air commence à chuter du fait des dégivrages périodiques nécessaires. Vers – 10 °C la puissance fournie est quasiment divisée par deux par rapport à celle produite à + 10 °C. Bien que de nombreuses annonces commerciales « garantissent » un fonctionnement possible jusqu'à – 15 °C, ces machines utilisant l'air comme source froide sont mieux adaptées aux régions tempérées. Les progr s de l'électronique de puissance permettent de contrôler la vitesse de rotation du compresseur (solution *inverter* en anglais). La puissance alors prélevée dans l'évaporateur se trouve idéalement ajustée au besoin de chauffage, en fonction de la température extérieure. Les performances remarquables atteintes en mi-saison compensent la baisse d'efficacité par grand froid.





### DIMENSIONNEMENT DE L'ÉVAPORATEUR À AIR

**Le choix de l'évaporateur se fait en connaissant la puissance frigorifique de la machine et, par exemple, grâce aux abaques des fabricants d'échangeurs à air. Logiquement il faudrait aussi tenir compte de la zone climatique d'installation.**

**La puissance des évaporateurs est généralement donnée pour un écart « dT », entre la température d'air entrant dans l'échangeur et la température d'évaporation, de 10 K. Cependant, les pompes à chaleur à air sont la plupart du temps spécifiées en puissance à + 7 °C et – 7 °C. Le point normatif à + 7 °C implique un large dimensionnement de l'évaporateur de fa on à éviter à tout prix le givrage de celui-ci (air entrant à + 7 °C et température d'évaporation voisine de 0 °C). Ainsi le COP n'est pas affecté par les cycles de dégivrage. Les performances à – 7 °C dépendent du dimensionnement de l'évaporateur mais aussi de la stratégie de dégivrage : température, fréquence et durée des cycles de dégivrage.**

**Le surdimensionnement reste toujours intéressant, car le dT diminue ce qui a pour effet d'accroître le COP.**

**Le choix et le dimensionnement de l'évaporateur à air sont du ressort du fabricant de pompe à chaleur.**

**Voici un exemple de puissance d'un évaporateur à + 7 °C et le débit d'air pulsé correspondant :**

**Pour 2 kW de puissance frigorifique, le débit d'air est : 1 000 m³/h.**

**Ces valeurs données à titre indicatif dépendent du fluide frigorigène utilisé et de l'espacement entre les ailettes.**

## Avantages

La mise en œuvre est simple, relativement bon marché, peu encombrante et sans gros travaux de terrassement, bien adaptée à la rénovation.

Les performances sont intéressantes en zone climatique tempérée (bord de mer notamment).

Les solutions inverter présentent une performance moyenne acceptable, même en région froide (température moyenne minimum = – 10 °C).

## Inconvénients

Les performances sont insuffisantes en région très froide (température moyenne minimum < – 15°C).

La ventilation de l'évaporateur génère du bruit.

Un dégivrage périodique de l'évaporateur avec collecte des condensats est nécessaire. Cette opération automatique dure peu de temps sur les pompes à chaleur modernes mais en dégrade cependant la performance et la fiabilité à cause de composants additionnels (vanne 4 voies d'inversion de cycle). Par temps de brouillard, le givrage de l'évaporateur intervient très rapidement, la puissance utile de la machine peut devenir insuffisante. Une résistance électrique est souvent utilisée pour pallier la baisse d'efficacité par grand froid et donc couvrir le besoin calorifique de l'habitation. D'où la nécessité de souscrire un contrat d'abonnement électrique de plus forte puissance.

Nous constatons que la puissance de la machine décroît alors même que les besoins en puissance de chauffage augmentent.





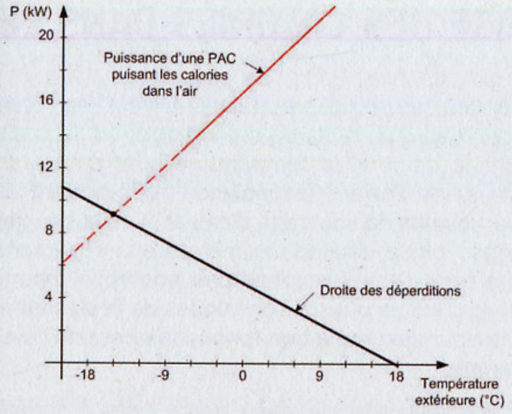



*Figure 2.1 – Exemple de puissance délivrée par une pompe à chaleur puisant les calories dans l'air en fonction de la température extérieure (en rouge) et droite des déperditions d'une habitation (en noir).*

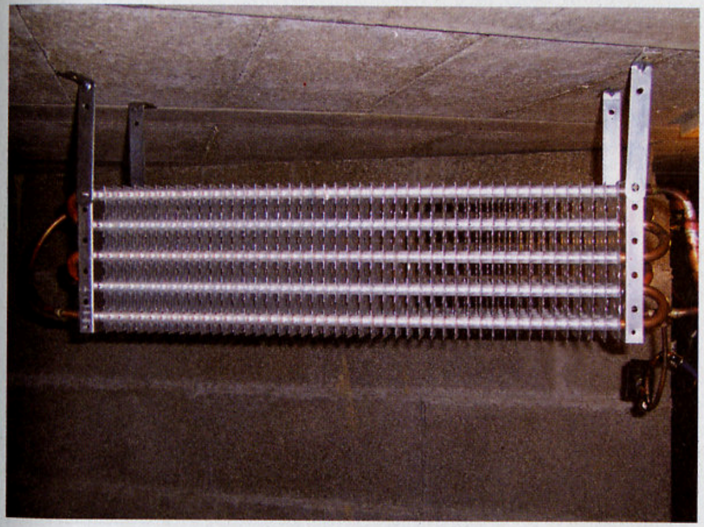


*Fig. 2.2 – Photo d'un évaporateur à air statique (non ventilé)*

# PUISAGE DES CALORIES DANS L'EAU

Classiquement, les pompes à chaleur utilisent l'eau d'une nappe phréatique, l'eau d'un puits ou d'un forage, ou l'eau d'un cours d'eau dont le débit et la température sont suffisants, même au plus froid de l'hiver. Ces solutions comportent aussi des exigences : le puits de soutirage d'eau et le puits de rejet doivent être éloignés d'une dizaine de mètres en respectant, le cas échéant, le sens d'écoulement naturel (soutirage en amont, rejet en aval). Les qualités physico-chimiques de l'eau sont à prendre en compte pour assurer le bon fonctionnement de l'évaporateur dans le temps.

L'eau est une source froide idéale grâce à ses propriétés physiques : excellent caloporteur ; très grande capacité calorifique (4,18 joules sont nécessaires pour élever 1g d'eau de 1 K).

## GESTION DU DÉGIVRAGE DE L'ÉVAPORATEUR

Pour les pompes à chaleur destinées au chauffage de l'habitat, le dégivrage de l'évaporateur se fait par inversion du cycle frigorifique : une vanne 4 voies permute la circulation du fluide frigorigène entre l'évaporateur et le condenseur. C'est-à-dire que l'évaporateur devient le condenseur et vice versa. Ainsi la chaleur apportée à l'échangeur extérieur permet de faire fondre rapidement la glace et le givre qui l'encombrent. La mise en marche des ventilateurs évacue l'eau présente entre les ailettes. La chaleur est prise à l'échangeur intérieur pendant l'inversion du cycle, il est donc souhaitable d'avoir une certaine réserve de calories côté source chaude (inertie) afin de ne pas ressentir de refroidissement dans l'habitation. Un plancher chauffant ou des radiateurs basse température couplés à un ballon tampon sont parfaitement adaptés.





Le processus classique : à mesure que du givre apparaît entre les ailettes de l'évaporateur, son efficacité diminue. Il en résulte un abaissement de la température d'évaporation (la BP diminue) et de ce fait, une baisse de la puissance fournie au condenseur.
Certains fabricants de pompes à chaleur air/eau mesurent l'écart de température entre l'entrée et la sortie d'eau du condenseur. Cette valeur est proportionnelle à la puissance délivrée par la pompe à chaleur à condition que le débit d'eau dans le condenseur soit constant.
Ainsi, si l'écart de température baisse significativement et pendant un temps suffisamment long, on peut en déduire que l'évaporateur fonctionne à très basse température (givre probable mais non certain). Le cycle de dégivrage est lancé.
Une autre méthode consiste à surveiller avec un pressostat BP la pression d'évaporation (proportionnelle à la température) et à la comparer à la température extérieure. Si la température d'évaporation devient significativement plus basse que la température extérieure, c'est que l'évaporateur n'est plus efficace et donc givré. Le cycle de dégivrage est lancé.
Cette méthode est très efficace puisqu'elle évite les dégivrages inutiles par temps très froid et sec.
Le cycle de dégivrage se termine lorsque la température de l'évaporateur atteint environ 10 °C. Sa durée est généralement de 5 minutes.
Le dégivrage par résistance électrique n'est pas adapté aux pompes à chaleur modernes, car trop gourmand en énergie électrique. En revanche, on pourrait imaginer un dégivrage naturel, donc très économique, pour des températures extérieures comprises, par exemple, entre 3 et 6 °C : lorsque l'évaporateur est excessivement givré, le compresseur s'arrête, les ventilateurs continuent de tourner pour faire fondre le givre. La fin du dégivrage est déclarée lorsque la température de surface de l'évaporateur rejoint la température extérieure.

## Avantages

Les performances sont excellentes et constantes puisque les calories sont extraites d'une eau dont la température est souvent comprise entre 11 et 13 °C (température moyenne des eaux souterraines).

La pompe à chaleur couvre la totalité des besoins calorifiques de l'habitation.

## Inconvénients

L'eau n'est pas disponible partout en quantité suffisante pour en retirer les calories capables de chauffer une habitation.

**DIMENSIONNEMENT DU DÉBIT D'EAU EN FONCTION DE LA PUISSANCE FRIGORIFIQUE**

Il convient tout d'abord de connaître la température minimale à laquelle l'eau peut descendre au cours de l'hiver. Cette valeur permet de choisir quel abaissement de température d'eau est acceptable (notée dT), afin de ne pas geler l'évaporateur et de conserver une performance intéressante.

La formule approchée du débit d'eau est :

Débit = 0,86 x $P_{frigo}$/dT

O $P_{frigo}$ (en Watts) est la puissance frigorifique extraite sur l'eau ; dT la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur ; le débit est exprimé en litres/heures.

Prenons un exemple : puissance de chauffage nécessaire pour l'habitation = 12 500 W ; température d'eau de la nappe phréatique = 12 °C. À cette température, nous estimons le COP à 5.

$P_{frigo}$ = $P_{therm}$ – ($P_{therm}$/5) = 10 000 W. Nous pouvons choisir un dT de 5 K (l'eau sortira de l'évaporateur à 7 °C).

Débit = 0,86 x 10 000/5 = 1 720 l/h.





Le puisage et le rejet de l'eau nécessitent habituellement des travaux coûteux.

L'eau gèle ! Un petit cours d'eau glacé en hiver ne permettra donc pas de récupérer beaucoup d'énergie…

La surveillance du débit d'eau est indispensable afin de ne pas geler (et donc casser) l'évaporateur.

La consommation électrique de la pompe de relevage grève la performance globale, particulièrement si l'eau est puisée à grande profondeur.

Un entretien régulier de la pompe de relevage est à prévoir.

# PUISAGE DES CALORIES DANS LA TERRE (GÉOSOLAIRE)

La terre utilisée comme source froide connaît un engouement réel ces dernières années. Dans ce cas, plus besoin de chercher de l'eau et plus de problèmes de performances dans les régions froides.

Les calories sont extraites de la terre qui fonctionne comme un accumulateur saisonnier géant : la pluie, le vent, le soleil temp rent la surface de la terre. Celle-ci prend durant l'année une température moyenne d'autant plus stable que l'on mesure en profondeur. Vers 1,5 m de profondeur, l'hiver ne provoque plus le gel de la terre. Plus on descend en profondeur, plus la température croît, mais moins l'influence du climat se ressent. Par conséquent, un captage de calories trop profond ne sera plus compensé par la remontée des températures extérieures et les précipitations du printemps et de l'été.

Dans le cas d'un capteur plan, un réseau de tubes (constitué de plusieurs boucles) est enterré entre 60 cm et 1,2 m de profondeur sur une surface dépendant de l'énergie à extraire.

La profondeur dépend de l'altitude : en plaine et jusqu'à 700 m, un enfouissement à 60 cm suffit. Entre 700 m et 1 200 m d'alti-

tude, les tubes sont enterrés entre 1 et 1,2 m. (Nous n'avons pas d'expérience de capteurs installés à plus 1 200 m d'altitude.)

Une sorte d'énorme matelas de terre constitue donc les provisions énergétiques de l'habitation pour l'hiver !

Ce type de captage n'est donc pas réellement « géothermique » puisque l'essentiel du flux thermique naturel arrive par le dessus et non pas du centre de la terre. Nommons-le plutôt « géosolaire ».

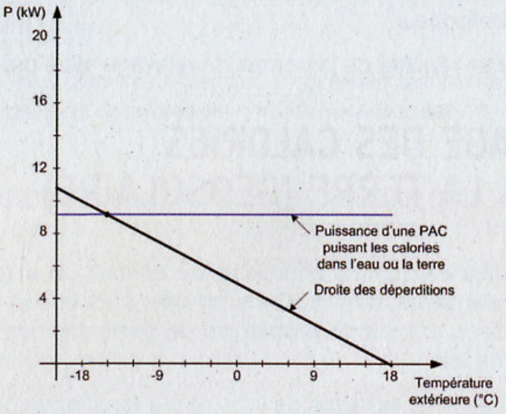



*Figure 2.3 – Exemple de puissance délivrée par une pompe à chaleur puisant les calories dans l'eau ou la terre en fonction de la température extérieure (en bleu) et droite des déperditions d'une habitation (en noir).*

Pour une pompe à chaleur puisant les calories dans de l'eau à température constante (cas d'une nappe phréatique), la puissance délivrée est rigoureusement stable quelle que soit la température extérieure.

Pour une pompe à chaleur puisant les calories dans la terre, la puissance varie légèrement au cours de l'hiver mais sur une durée très longue (plusieurs semaines). Les variations de température entre le jour et la nuit n'influencent aucunement la puissance délivrée par la pompe à chaleur. Le graphique ci-dessus conserve donc sa pertinence.





## Pourquoi la source froide « terre » est-elle très efficace ?

La terre présente une conductivité thermique et une capacité thermique intéressantes. En pratique, cela se traduit par une température du sol relativement stable, même lorsqu'on y puise de l'énergie. La conductivité thermique d'un sol dépend de sa composition. Les minéraux sont 5 fois plus conducteurs que l'eau, 10 fois plus conducteurs que les matières organiques et 100 fois plus conducteurs que l'air.

C'est donc, avant tout, un sol compact et à faible teneur en air qui sera performant pour une pompe à chaleur géosolaire.



*Fig. 2.4 – Influence du captage de calories sur la fonte de la neige*

Contrairement à une idée très répandue, le gel du sol provoqué par le captage de calories n'est pas un inconvénient en termes d'efficacité pour une pompe à chaleur. La raison en est que la glace présente une meilleure conductivité thermique que l'eau liquide (2,3 W/m.K pour la glace contre 0,6 W/m.K pour l'eau).

De plus, le gel de l'eau contenue dans le sol permet de profiter, à température constante, de sa fabuleuse chaleur latente de solidification (334 000 J/kg !).

### RÈGLES À RESPECTER POUR LA POSE D'UN CAPTEUR PLAN

Les valeurs de dimensionnement habituellement retenues sont :

Puissance captée par m tre linéaire de tube enterré = 15 Watts maximum pour des températures extérieures de base > – 10 °C ; 10 à 12 Watts pour des températures extérieures de base < – 10 °C.

Espacement des tubes (le pas) = 40 à 50 cm ; 50 à 60 cm si le capteur est à l'ombre (exposition plein nord).

Quelle que soit la configuration, lorsque c'est possible, il est toujours avantageux d'augmenter le pas.

La puissance extraite du sol dépend de sa nature : 15 W/ml est une valeur moyenne. Même si certains terrains (argileux humides) peuvent fournir 20 W/ml tandis que d'autres (caillouteux sec) n'acceptent que 10 W/ml, il est sage de ne pas prélever plus de 15 W/ml. En cas de doute sur la nature du sol, nous recommandons, pour homogénéiser ces valeurs, de placer le réseau de tubes dans un lit de sable qui aura aussi l'intérêt d'assurer une protection mécanique indispensable si le terrain est caillouteux, ainsi que le drainage de l'eau.

Autres règles à respecter pour la pose d'un capteur plan : ne pas planter de gros arbres sur le capteur (se limiter à des arbustes) ; ne pas recouvrir le capteur de revêtement étanche et/ou rigide tel que terrasse, goudronnage etc ; les canalisations susceptibles de geler (eaux, égouts, etc. ) doivent se trouver à 1,5 m au moins du capteur et les constructions en dur à 2 m.

Dans le but de faire fonctionner la pompe à chaleur à une température d'évaporation la plus élevée possible, certains





constructeurs (suisses, allemands, canadiens, fran aisé) préconisent une profondeur d'enfouissement du capteur plan à eau glycolée relativement importante (1 m à 1,5 m). Pour assurer la régénération en température du terrain, la surface du capteur est fortement augmentée ainsi que la longueur totale de tubes de captage. La puissance linéique prélevée est divisée par 2 soit environ 7 W/ml. La surface du capteur est doublée et atteint souvent 4 fois celle de l'habitation à chauffer. On gagne ainsi quelques précieux degrés sur la température d'évaporation : 0 à – 3°C au lieu de – 5 à – 8 °C souvent constatés. Le gain sur le COP est appréciable (+ 10 à + 15 %), voisin de celui obtenu avec un forage profond et compense largement la surconsommation d'un puissant circulateur pour l'eau glycolée. Malheureusement, les grands terrains pouvant accueillir de tels capteurs sont de plus en plus rares et chers...

Le seul inconvénient du gel concerne le gonflement du sol qui peut devenir critique, surtout en présence d'argile, qui retient davantage l'eau. Aussi, le dimensionnement des capteurs plans doit-il être rigoureux, tel que nous le verrons ci-après.

## Dimensionnement des capteurs plans géosolaires

Le dimensionnement des premiers capteurs plans (début des années 1990) s'est fait de manière expérimentale et aussi, hélas, avec l'objectif de réduire les coûts. Nous connaissons d'anciens réseaux de tubes sous-dimensionnés d'un facteur 2 par rapport à ce qui se fait actuellement ! Les conséquences désastreuses sont apparues rapidement : terrain gelé dans la masse qui gonfle et s'élève de plusieurs dizaines de centim tres ; performances déplorables des pompes à chaleur couplées à de tels capteurs ; fiabilité très mauvaise des compresseurs qui fonctionnent en

dehors de leurs plages de température normale ; s'ensuit la réputation des capteurs plans qui ne fonctionnent pas dans le temps, du sol qui « s'épuise »... Citons aussi les déboires des capteurs enterrés à plus de 2 mètres de profondeur qui ne se régénéraient pas suffisamment et perdaient, au fil des hivers, leur efficacité.

Actuellement, les règles de l'art sont le plus souvent respectées et le dimensionnement du capteur plan ne devrait plus être victime d'économies irrationnelles.

## Le capteur à eau glycolée

Dans des tubes en polyéthylène du capteur plan (diamètre extérieur des tubes : 20 à 32 mm, longueur des boucles : 50 à 100 m pour limiter les pertes de charge) circule un mélange d'eau et d'antigel (eau glycolée). L'évaporateur se présente alors sous forme d'un échangeur à plaques dans lequel circule l'eau glycolée réchauffée par le terrain. Ce mode de captage nécessite un circulateur, un vase d'expansion supplémentaire, deux distributeurs et un détecteur de débit pour protéger l'évaporateur d'une prise en glace en cas de déficience du circuit d'eau glycolée. Il est adaptable, même sur les terrains en pente, à condition de placer les distributeurs sur un point haut pour pouvoir purger le circuit.

### *Avantages*

Ce système convient aux terrains pentus (prévoir cependant une purge au point haut).

Il permet de faire du rafraîchissement très facilement à moindre coût : l'eau du capteur, fraîche en été, peut circuler directement dans une dalle de plancher chauffant basse température : « free cooling » en anglais).

Il est possible de coupler l'eau glycolée du terrain avec des capteurs solaires basse température.

La mise en œuvre est simple, type « plomberie hydrocablée ».





Pas de frein technique au surdimensionnement du capteur. La pompe à chaleur couvre la totalité des besoins calorifiques de l'habitation.

### *Inconvénients*

La performance est légèrement abaissée par la consommation du circulateur.

Le coût est élevé du fait des composants additionnels : circulateur, vase d'expansion, distributeurs, détecteur de débit d'eau glycolée.

**EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT D'UN CAPTEUR GÉOSOLAIRE À EAU GLYCOLÉE**

**Soit une pompe à chaleur de 10 kW thermique possédant un COP de 4.**
**$P_{therm} = 10$ kW**
**$P_{élec} = P_{therm}/COP = 10/4 = 2,5$ kW**
**$P_{frigo} = P_{therm} - P_{élec} = 10 - 2,5 = 7,5$ kW.**
**Le terrain doit donc fournir 7,5 kW.**
**La surface de terrain disponible est importante, nous choisissons un capteur largement dimensionné avec une puissance prélevée de 7,5 W/ml en tubes de diamètre 20 mm.**
**Longueur de tube nécessaire = 7 500/7,5 = 1 000 m. Il est possible de constituer 10 circuits de 100 m posés avec un pas de 0,4 ou 0,5 m. D'autres combinaisons nombre/longueur des circuits seraient envisageables (par exemple 14 circuits de 71 m).**
**Surface du capteur avec un pas de 0,4 m : 1000 x 0,4 = 400 m².**
**Le volume d'eau glycolée contenu dans les tubes est d'environ 200 litres ce qui représente un coût non négligeable.**

Le captage des calories à température moyennement basse (– 5 °C) rend le capteur sensible à la conductibilité thermique du terrain, d'où un surdimensionnement habituel.

Quantité de glycol importante, source de pollution en cas de fuite, surtout en ce qui concerne le monoéthylène glycol. Le monopropylène glycol, peu polluant, reste cher.



*Fig. 2.5 – Photo d'un capteur plan à eau glycolée*

## Le capteur plan à fluide frigorigène

Il est aussi possible de faire circuler directement le fluide frigorigène dans des tubes de cuivre gainés de polyéthylène, pour éviter la corrosion au contact du sol (diamètre extérieur des tubes : environ 10 mm). Dans ce cas, le réseau de tubes enterrés constitue directement l'évaporateur. Ce principe simplifie la pompe à chaleur côté source froide mais implique une mise en œuvre très soignée.





Le fluide frigorigène doit se répartir équitablement entre les couronnes. C'est le rôle du distributeur de liquide dont l'entrée provient du détendeur et les sorties vont aux différents circuits de l'évaporateur. L'installation et la réalisation du distributeur de liquide doivent être conformes aux prescriptions du fabricant du détendeur (montage vertical sous le détendeur ; chaque brin relié à chaque couronne doit induire une perte de charge de 0,5 bars environ).

L'huile de lubrification entraînée par le fluide doit revenir au compresseur. Des problèmes peuvent apparaître sur les terrains en pente : la répartition du fluide se fait moins bien et l'huile peut rester piégé aux points bas des couronnes. Les pièges à huile, sous forme de petites boucles agissant comme des siphons, ne sont que des pis-aller : les « bouchons » d'huile créés par les siphons peuvent déséquilibrer la répartition du fluide dans les différentes boucles. Aussi conseillons-nous ce type de capteurs jusqu'à une dénivelée maximum de 2 mètres entre les points extrêmes du capteur, avec un seul piège à huile par couronne à mi-dénivelée. Le terrassier peut avantageusement « tricher » en jouant sur la profondeur d'enfouissement des couronnes : par exemple, les tubes seront enterrés à 1 m au point haut du capteur et seulement à 60 cm au point le plus bas.

### Avantages

Le captage des calories est très efficace, donc peu sensible à la nature du sol, car l'évaporation peut se faire à température extrêmement basse, jusqu'à – 15 °C (mais au détriment du COP).

L'évaporateur étant le capteur, cela apporte simplicité et fiabilité.

À taille de capteur identique, la performance est légèrement meilleure qu'avec un capteur à eau glycolée du fait de la suppression d'un échangeur et de l'absence du circulateur.

La pompe à chaleur couvre la totalité des besoins calorifiques de l'habitation.

### Inconvénients

Ce système n'accepte pas beaucoup de dénivelée mais il n'existe pas de problème de purge.

L'intervention d'un frigoriste est nécessaire pour braser les couronnes du capteur sur le distributeur de liquide et effectuer la charge en fluide frigorigène (exception faite des pompes à chaleur dont les couronnes « prêtes à l'emploi » sont brasées et chargées en usine).

La quantité de fluide frigorigène est importante, source de pollution de type effet de serre en cas de fuite.

Le rafraîchissement économique de type « free cooling » est impossible.

Si le fluide frigorigène se répartit mal dans les différents circuits, le capteur perd de l'efficacité et la température d'évaporation baisse. Le COP est moins bon. Ce risque augmente avec la taille du capteur : plus il y a de circuits, plus la probabilité d'une mauvaise répartition est importante.



*Figure 2.6 – Tube d'un capteur plan à fluide frigorigène accidentellement déterré.*





Notons que les problèmes de capteur sous-dimensionnés cités ci-dessus ont eu lieu (et hélas ont encore lieu parfois sur des pompes à chaleur aux prix très tirés) principalement sur des capteurs à fluide frigorigène.

En voyant la photo ci-dessus on comprend aisément comment un capteur probablement mal dimensionné et mal installé arrive à perdre son efficacité dans le temps. Seulement trois hivers ont suffi à créer une galerie tout autour du tube à cause d'un excès de gel entraînant une baisse d'efficacité très sensible. Plusieurs paramètres conjugués ont conduit à ce résultat :

- Une puissance linéique trop importante et/ou un pas de pose trop faible par rapport à ce que peut apporter ce terrain et donc une phase de dégel très longue.
- Une profondeur d'enfouissement insuffisante, localement bien inférieure à 60 cm et donc un poids de terre insuffisant au niveau des tubes.
- Une qualité de terre sans doute médiocre qui a tendance à se compacter et se « bétonner » avec les nombreuses pierres.
- L'absence d'un lit de sable qui pourtant était nécessaire dans ce terrain caillouteux.

**EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT D'UN CAPTEUR GÉOSOLAIRE À FLUIDE FRIGORIGÈNE**

**Soit une pompe à chaleur de 10 kW thermique possédant un COP de 4.**

**$P_{therm}$ = 10 kW**

**$P_{élec} = P_{therm}/COP$ = 10/4 = 2,5 kW**

**$P_{frigo} = P_{therm} - P_{élec}$ = 10 – 2,5 = 7,5 kW.**

**Le terrain doit donc fournir 7,5 kW.**

**Longueur de tube nécessaire = 7 500/15 = 500 m. Les couronnes de cuivre mesurent généralement 60 m chacune. Il convient de placer 9 couronnes de 60 m soit 540 m.**

**Surface du capteur avec un pas de 0,5 m : 540 x 0,5 = 270 m².**

### Comportement de l'évaporateur type capteur plan au cours d'un hiver

Du fait de son petit diamètre (10 mm), le tube de cuivre gainé présente une surface en contact avec le sol relativement faible. De plus, ce contact n'est peut-être pas toujours parfait à cause de la granulométrie du terrain (présence de vides d'air). L'échange entre la terre et le fluide est donc médiocre. Il en résulte qu'en début de période de chauffe, la température d'évaporation s'abaissera rapidement. Quelques dizaines de jours suffiront à faire descendre la température des tubes et leur environnement immédiat vers une température proche de 0 °C. La température minimale d'évaporation (vers – 8 à – 9 °C) sera atteinte plutôt en début d'hiver, amorçant ainsi le gel d'un diamètre de terre croissant tout autour des tubes. La terre peut geler sur un rayon de 5 à 10 cm autour du tube (voir photo). Le terrain gonfle lorsque les manchons de terre gelée de deux tubes voisins sont trop proches. Le pas de pose minimum est de 40 cm. On comprend, au vu des mesures, que ces manchons de terre gelée augmentent virtuellement le diamètre du tube, ce qui explique pourquoi l'échange thermique s'améliore vers le milieu de l'hiver (la glace et la terre gelée sont meilleures conductrices thermiques que la terre). La température minimale d'évaporation remonte vers – 5 à – 7 °C. L'hiver s'achève avec des températures d'évaporation stables, autour de – 5 °C, tandis que les intempéries printanières contribuent au dégel du terrain. Lors du dégel il est primordial que la terre revienne bien en contact avec les tubes pour éviter les situations telles que sur la figure 2.6. Voici dans le tableau ci-dessous un exemple de l'évolution de la température d'évaporation au cours d'une saison de chauffe en moyenne montagne (altitude = 800 m).

| Octobre | Novembre | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 °C | – 6 °C | – 9 °C | – 8 °C | – 7 °C | – 7 °C | – 5 °C |







*Fig. 2.7 – Photo de capteurs plans à fluide frigorigène*



*Fig. 2.8 – Photo d'un manchon de glace autour d'un tube mis à nu*

Les contraintes de surface nécessaire aux capteurs plans les rendent inadaptés aux petits terrains. Hélas, les tendances d'urbanisme s'orientent vers la réduction des surfaces de terrain par rapport aux surfaces habitables. Qui, à l'avenir, pourra encore disposer d'assez de place pour installer un capteur plan ?

## Le capteur vertical de type forage profond

Autre méthode pour exploiter la source froide « terre » : les capteurs sont dans des puits verticaux.

Deux tubes en « U » dans lesquels circule l'eau glycolée sont descendus dans un forage de 20 à 100 mètres de profondeur. Le trou est ensuite bouché généralement avec un mélange de ciment et d'argile. Selon la puissance à extraire, plusieurs puits verticaux peuvent être nécessaires, éloignés les uns des autres de 6 à 10 m selon la qualité du terrain.

La puissance retirée de tels capteurs varie de 30 Watts/mètre linéaire de forage, pour un terrain plutôt sablonneux et sec à 60 Watts/mètre linéaire de forage, dans des sédiments saturés d'eau. Le professionnel chargé du forage sera seul compétent pour quantifier le potentiel énergétique du terrain.

Plus les forages sont profonds, plus la probabilité de trouver de l'eau est grande. Dans cette hypothèse, la qualité de l'échange avec le capteur est excellente et la régénération du terrain l'été assurée. Des mesures de température des capteurs dans des puits verticaux démontrent que le terrain se refroidit rapidement et durablement les 2 à 3 premières années. Ensuite, une température d'équilibre semble apparaître. Une incertitude quant à l'aptitude du terrain à fournir des calories dans de bonnes conditions sur une durée d'une vingtaine d'année subsiste.

### *Avantages*

- Très bonnes performances stables pendant l'hiver, indépendamment de la température extérieure.
- Solution possible quelle que soit la nature du terrain (forage de la roche possible).





- Emprise au sol minimum.
- La pompe à chaleur couvre la totalité des besoins calorifiques de l'habitation.
- Possibilité de fonctionner en plancher rafraîchissant de type free cooling.

### *Inconvénients*

- Coût des forages très élevé.
- Nécessité de passer par une entreprise spécialisée (l'Est de la France est assez bien desservi car les puits verticaux sont beaucoup pratiqués en Suisse et en Allemagne).
- Autorisation nécessaire de la DRIRE.
- Présence nécessaire du vase d'expansion, du circulateur et du détecteur de débit d'eau glycolée.
- Incertitude concernant la régénération du terrain à très long terme, surtout en absence d'eau souterraine.

# PUISAGE DES CALORIES DANS UN LIT DE GALETS OU DANS DES MASSES BÉTONNÉES

Une autre alternative au capteur « terre » consiste à utiliser un important volume de galets entre lesquels il convient de faire circuler de l'air. Lorsque la température extérieure est élevée, de l'air tiède vient chauffer les galets. Lorsque l'habitation a besoin de chauffage, une pompe à chaleur à air extrait les calories stockées dans le lit de galets. Un vide sanitaire peut servir à installer le volume de galets.

Ce principe, plutôt anecdotique, reste très peu répandu.

Certains fabricants actuels proposent un système similaire constitué de masses en béton (murs de clôture par exemple) qui agissent comme un accumulateur. Par temps doux, le béton s'élève en température, tandis qu'il restitue les calories emmagasinées lorsque la pompe à chaleur fonctionne. L'échange avec le

béton se fait en y noyant des tubes plastiques pour faire circuler un mélange d'eau et de glycol. Des tubes de cuivre gainé faisant office d'évaporateur direct seraient aussi envisageables.

Là encore, il s'agit de solutions de chauffage très peu répandues et adaptées à des habitations présentant des déperditions extrêmement faibles (standard Minergie en Suisse par exemple).

**RECOMMANDATIONS**

**Les pompes à chaleur n'acceptent pas une température de source froide trop élevée, car les gaz aspirés par le compresseur contribuent à son refroidissement. De plus, plus les gaz aspirés sont chauds, plus les gaz refoulés le sont aussi. La limite haute de température des gaz aspirés se situe vers 25 °C. Il n'est donc pas possible d'utiliser directement l'eau de capteurs solaires thermiques comme source froide. Dans ce cas, autant faire circuler directement l'eau des panneaux solaires dans un plancher chauffant basse température et utiliser la pompe à chaleur lorsque le rayonnement solaire fait défaut.**

## CONCLUSION

D'une manière générale, la récupération des calories dans des corps denses (eau, terre, pierre) fonctionne mieux que dans l'air, grâce à leur diffusivité thermique (contribution de la capacité calorifique et de la conductivité thermique). Ce type de pompes à chaleur couvre la totalité des besoins énergétiques d'une habitation. Hélas, les terrains à bâtir deviennent de plus en plus petits, les capteurs plans sont, faute de surface, souvent impossibles à implanter. Il reste soit les puits verticaux, soit à imaginer des solutions pour réduire la surface du capteur plan.





## Comment réduire la surface d'un capteur plan ?

Voici une solution prometteuse : pour accroître la température moyenne hivernale de la terre et donc augmenter la performance, il est possible de la réchauffer efficacement grâce à des panneaux solaires thermiques. Il devient alors possible de réduire fortement la surface d'un capteur plan en intercalant entre les couronnes de la pompe à chaleur d'autres couronnes provenant des panneaux solaires. Le double réseau de tubes peut, dans ce cas, être disposé à deux profondeurs d'enfouissement différentes (par exemple à 60 cm et 120 cm). La surface occupée par le capteur se trouve divisée par deux.

Ce concept peut être poussé plus loin avec 3 voire 4 profondeurs d'enfouissement différentes, et donc diviser ainsi par 3 ou 4 la surface de terrain occupée. La réalisation d'un tel capteur ne mobilise qu'un engin de terrassement ordinaire (pelleteuse ou tracto-pelle) et non pas une foreuse pour atteindre de grandes profondeurs.

Des capteurs compacts, tels que décrits dans l'exemple ci-dessous, ne sont pertinents que dans le cas de terrains secs, sans nappe ou veine d'eau. En effet, la présence d'eau souterraine non stagnante est capable de déplacer avec elle d'importantes quantités de calories. Ainsi, l'énergie apportée par les capteurs solaires partirait dans le flux d'eau. Dans les forages profonds, la probabilité de rencontrer de l'eau souterraine est élevée. Les réchauffer avec des capteurs solaires serait une solution technique très aléatoire et inutilement onéreuse.

## EXEMPLE

Une villa à Clermont-Ferrand utilise une pompe à chaleur de 8 500 W thermiques avec un COP de 3,7.
La puissance électrique = 8 500/3,7 = 2 300 W environ.
La puissance frigorifique = 8 500 – 2 300 = 6 200 W.
Le capteur est composé de 7 couronnes de 60 m qui devraient occuper environ 210 m² de surface de terrain. En plaçant ce capteur sur 3 couches doublées d'un réseau chauffé par des panneaux solaires thermiques, la surface passe à 70 m² seulement. Supposons que cette habitation consomme 3 500 kWh/hiver pour alimenter la pompe à chaleur. L'énergie prélevée dans le terrain durant l'hiver est égale à l'énergie thermique injectée dans la maison moins l'énergie électrique consommée :
(3 500 x 3,7) – 3 500 = 9 500 kWh environ.
Quelle est la surface de capteur solaire nécessaire pour « recharger » le terrain à hauteur de 9 500 kWh, du mois de septembre au mois de mai ?
À Clermont-Ferrand, l'énergie moyenne reçue par m² de capteurs exposés au sud et inclinés à 60° de septembre à mai est d'environ 870 kWh. Contrairement au fonctionnement habituel pour produire de l'eau chaude à 40 °C ou plus, ces capteurs solaires vont travailler à très basse température (température de la terre) et donc leur rendement pourra atteindre 80 % (au lieu de 50 % environ pour du chauffage solaire). Énergie nette hivernale récupérée : 870 x 0,8 = 696 kWh/m². La surface de capteurs solaires est donc :
9 500/696 = 13,6 m². Durant les mois d'été, le terrain pourra continuer à être réchauffé efficacement par les capteurs solaires. 5 à 6 panneaux solaires de 2,4 m² conviennent et ne constituent pas un investissement très important (2 500 à 3 000 € pour les 5 ou 6 panneaux). Par ailleurs, leur circuit d'alimentation est simple : un circulateur et un vase d'expansion.





## ATTENTION AUX CAPTEURS PLANS DE FAIBLE SURFACE

Un système allemand de captage des calories sur une surface réduite (environ 3 fois inférieur à un capteur plan classique) existe depuis quelques années. Il est basé sur la circulation d'eau glycolée dans des nappes de tubes très rapprochés ce qui permet d'améliorer la conduction thermique entre la terre et l'eau glycolée et conduit donc a priori à une température d'évaporation pas trop basse (du moins en début d'hiver). Il n'en reste pas moins que pour chauffer l'habitation tout au long de l'hiver « le matelas de calories » doit avoir un volume suffisant. Ainsi, comme les premiers capteurs à fluide frigorigène, ce système engendre hélas un excès de gel du terrain et les désordres qui vont avec : gonflements, souffrance de la végétation de surface, non dégel de la terre d'un hiver sur l'autre. Ajoutons à cela le risque de destruction du capteur à cause des contraintes mécaniques dues à l'excès de gel : les matériaux plastiques deviennent généralement cassants au froid contrairement au cuivre.

# 3 Comment restituer les calories ?

Il convient, à présent, de choisir quelle source chaude va restituer les calories dans l'habitation. Les solutions diffèrent assez peu de celles utilisées pour la source froide : air, eau et béton (à la place de la terre).

## RESTITUTION DES CALORIES DANS L'AIR

En sortie de compresseur, les calories véhiculées par le fluide frigorigène doivent être récupérées par le condenseur. Cet échangeur à air est très semblable à un évaporateur à air. Il accepte une plus grande pression que l'évaporateur puisqu'il fonctionne à plus haute température. L'installation peut comporter un ou plusieurs condenseurs le plus souvent ventilés (appelés aussi ventilo-convecteurs).

### Avantages

- La faible inertie de l'air permet d'obtenir une élévation de température dans les pièces chauffées extrêmement rapide.
- Pour les régions chaudes, si la pompe à chaleur est réversible, le condenseur devient évaporateur et le chauffage se transforme en climatisation. Cet avantage est écologiquement discutable...
- Mise en œuvre simple, applicable facilement pour la rénovation.





### Inconvénients

- Mauvaise répartition de la chaleur dans les pièces puisque l'air chaud monte directement au plafond.
- Difficulté pour répartir la chaleur dans différentes pièces, à moins de multiplier le nombre de ventilo-convecteurs.
- Brassage de l'air et de poussières désagréable.
- Chauffage sans inertie, qui peut induire des variations de températures brutales.
- Bruit généré par le ventilateur.

La ventilation forcée diffuse la chaleur dans l'habitation. Elle est utile pour conserver une température de condensation du fluide suffisamment basse, réduire l'encombrement du condenseur et obtenir une performance intéressante. Elle devient indispensable pour la fonction climatisation.

**DIMENSIONNEMENT DU CONDENSEUR À AIR**

**Le choix du condenseur se fait en connaissant la puissance calorifique de la machine et, par exemple, à l'aide des abaques des fabricants d'échangeurs à air. Il faut aussi tenir compte de la zone climatique d'installation. Le type de ventilateur utilisé est important pour garantir un confort acoustique acceptable : préférez les faibles vitesses de rotation, les ventilateurs tangentiels et les grandes surfaces de bouches pour limiter les bruits d'écoulement d'air.**
**Le choix et le dimensionnement du condenseur à air sont du ressort du fabricant de pompe à chaleur.**

## RESTITUTION DES CALORIES DANS L'EAU

Le condenseur est un échangeur fluide/eau qui peut être tubulaire coaxial ou à plaques. Le circuit d'eau qui le traverse est celui d'un chauffage central classique, composé de radiateurs à

eau et/ou de planchers chauffants. L'écart de température entre le fluide frigorigène et l'eau doit être le plus faible possible. Pour cela, le condenseur sera largement dimensionné avec un débit d'eau le traversant important. La formule qui régit la puissance fournie à l'eau dans le condenseur est :

P = (4,18 x débit x dT)/3,6.

- Où P est la puissance fournie à l'eau en Watts (W) ;
- dT la différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur en Kelvin (K) ;
- « débité » le débit d'eau traversant l'échangeur en litres/heure.

À puissance donnée, si le débit augmente, dT diminue. Alors la température de condensation diminue aussi et la performance est meilleure.

La consommation d'énergie électrique du compresseur est étroitement liée à la pression qu'il doit fournir. Or, la pression étant proportionnelle à la température, il y a tout intérêt à condenser à basse température. Pour cette raison, les planchers chauffants basse température sont particulièrement bien adaptés aux pompes à chaleur. Dans le cas où les radiateurs seraient irremplaçables (en rénovation, par exemple), il convient de s'assurer que ceux-ci présentent une surface d'échange suffisante. Une mesure de la température d'eau dans les radiateurs s'impose avant de remplacer une chaudière thermique (fuel, gaz ou bois) par une pompe à chaleur. Retenons que la plupart des pompes à chaleur peuvent produire de l'eau à 55 °C. Certaines permettent d'atteindre 65 °C.

## Avantages

- Distribution facilitée de la chaleur dans toutes les pièces de la maison.
- Possibilité de réguler précisément la température de chaque pièce.
- Confort incomparable du plancher chauffant grâce à une répartition de la chaleur optimale.





- La circulation d'eau est silencieuse (à condition que la vitesse de circulation soit en rapport avec le diamètre des tuyaux).
- Installations répondant aux métiers de la plomberie.
- Régulation d'ambiance en fonction de la température extérieure possible.

## Inconvénients

- Impossibilité de climatiser avec des radiateurs. Le plancher rafraîchissant reste moyennement efficace, surtout en région côtière où l'air est humide, ce qui augmente le risque de condensation sur le sol.
- L'inertie du plancher chauffant n'est pas souhaitable dans les régions au climat méditerranéen.
- Mise en œuvre à prévoir dès la construction, sinon les travaux en rénovation sont complexes et onéreux.
- Prix relativement élevé d'une installation à eau.

## Dimensionnement des radiateurs à eau

Il convient de faire fonctionner les radiateurs avec de l'eau la moins chaude possible (retenons 45 °C idéalement) pour maintenir la performance de la pompe à chaleur. Dans ce cas, leur surface sera d'autant plus importante que l'habitation est insuffisamment isolée : un peu plus du double, par rapport aux radiateurs fonctionnant sur une chaudière thermique (fuel, gaz ou bois). Les fabricants spécifient la puissance des radiateurs standards en Watts pour un dT = 50 K (dT est la différence entre la température moyenne du radiateur et la température ambiante de la pièce qu'il chauffe).

dT = [(température d'eau en entrée + température d'eau en sortie)/2] – 20 pour une ambiance à 20 °C.

Pour des radiateurs basse température, si l'eau rentre à 45 °C, ressort à 35 °C : la température moyenne est de 40 °C, donc dT = 20 K pour une ambiance à 20 °C.

Le radiateur sera donc approximativement 2,5 fois moins puissant à surface égale qu'à dT = 50 K. Par exemple, un radiateur vertical de 185 x 32 x 9 cm, donné pour 2 500 W ne restituera que 1 000 W environ. Notons que le calcul ci-dessus est légèrement optimiste car il ne prend pas en compte l'effet radiatif du radiateur, proportionnel à la température, élevée à la puissance 4 ($T^4$).

## Raccordement hydraulique de la pompe à chaleur sur le circuit radiateurs

Lorsqu'une pompe à chaleur se raccorde à un circuit de chauffage central à radiateurs, en lieu et place d'une chaudière traditionnelle, il convient de s'assurer que le volume total d'eau contenu dans le circuit est compatible avec la puissance de la machine. Ce volume doit être supérieur à 15 litres/kW pour assurer un fonctionnement de la pompe à chaleur sans cycles trop courts (les démarrages et arrêts trop fréquents sont néfastes à la longévité des compresseurs et à la performance du chauffage). Si ce n'est pas le cas, il convient d'ajouter un ballon tampon monté en série dans le circuit. Ce type d'installation est simple et ne nécessite qu'un seul circulateur. Attention aux robinets thermostatiques : prévoir plusieurs radiateurs avec des robinets ordinaires toujours ouverts, afin de garantir un débit suffisant dans le circuit. Ces radiateurs sont généralement installés dans la pièce où se trouve le thermostat d'ambiance, tandis que ceux équipés de robinets thermostatiques sont placés logiquement dans les chambres.

Une telle installation, simple et peu onéreuse du point de vue investissement, présente cependant l'inconvénient de faire varier dans une amplitude importante (10 K) la température des radiateurs. Il en résulte un inconfort thermique variable en fonction de l'inertie du bâtiment et selon le type de radiateurs, des bruits de dilatation gênants, particulièrement dans les chambres. Il y a donc tout intérêt à augmenter au maximum le volume d'eau en circulation par l'ajout d'un ballon tampon en série avec les radiateurs, de manière à limiter l'amplitude de variation de la température d'eau (dT = 5 K au lieu de 10 K par exemple).





### CALCUL DU TEMPS DE FONCTIONNEMENT DE LA POMPE À CHALEUR EN FONCTION DU VOLUME D'EAU

Exemple de calcul du temps de cycle de la pompe à chaleur de 10 kW. Prenons l'hypothèse simplificatrice du fonctionnement des radiateurs en adiabatique (pas d'échange de chaleur) pour la différence entre la puissance installée et la puissance nécessaire au chauffage.
Considérons que la puissance de la pompe à chaleur est le double de la puissance nécessaire par temps doux (la machine fonctionne 50 % du temps en moyenne).
Temps de fonctionnement :
T = (V x 4,18 x dT)/Surpuissance
Où T est le temps de marche en secondes,
V le volume total de l'installation en litres,
dT est l'élévation de température de l'eau en K.
Cette valeur réglable est l'hystérésis (appelée aussi différentiel) d'un thermostat sur l'eau.
Surpuissance = puissance thermique de la pompe à chaleur – puissance nécessaire (en kW).
Application numérique :
Surpuissance = 10 kW – 5 kW = 5 kW
V = 150 litres (15 l/kW)
Choisissons dT = 10 K.
Dans ces conditions, T = 1254 s, soit environ 21 minutes.
Cela conduit à 1 cycle (temps de marche plus temps d'arrêt) de 42 minutes, ce qui est tout à fait acceptable pour la longévité du compresseur.
Une surpuissance trop importante de la pompe à chaleur par rapport à ce que peuvent dissiper les radiateurs conduit à une élévation de température d'eau très rapide, donc à des cycles de fonctionnement trop courts. C'est par temps doux, lorsque les besoins énergétiques de l'habitation sont faibles, que les cycles de marche très courts dégradent les performances.
Retenons comme valeur idéale, une surpuissance de 10 % au plus froid de l'hiver.

Autre solution, apparemment plus confortable, mais plus complexe, avec un investissement supérieur et une efficacité moindre :

Placer en parallèle, sur le circuit des radiateurs, un ballon tampon dont le volume est calculé avec les mêmes formules que ci-dessus. Un volume d'environ 20 litres/kW constitue un choix correct. La présence d'une vanne trois voies est alors nécessaire pour distribuer l'eau dans les radiateurs à température constante. Cette vanne peut être motorisée et asservie en fonction de la température extérieure, ce qui procure un excellent confort de régulation de la température ambiante. Par contre, la pompe à chaleur consomme plus, car elle doit fournir de l'eau à une température supérieure à celle nécessaire aux radiateurs, pour alimenter le ballon tampon monté en parallèle. Nous déconseillons cette solution, particulièrement si elle impose une pompe à chaleur haute température (65 °C) : l'évolution de la technologie ne devrait pas servir à résoudre les problèmes engendrés par des schémas hydrauliques inadaptés.

## Dimensionnement du plancher chauffant

Un plancher chauffant à basse température est constitué d'un tube en polyéthylène réticulé (ou en polybutyène), de diamètre 13 mm intérieur et 16 mm extérieur, noyé dans une chape flottante de chauffage. Les Documents Techniques Unifiés (DTU) décrivent précisément le mode de pose du tube et la réalisation de la chape (composition, épaisseur, pose, séchage, revêtement, etc.).

De même qu'on dimensionne la puissance des radiateurs, la puissance fournie par le plancher chauffant doit être calculée pour chaque pièce en fonction des déperditions et de la température souhaitée.

C'est au chauffagiste de choisir la densité de tubes dans la chape. Plus les tubes sont serrés, meilleur est l'échange thermique entre l'eau et le sol. L'espacement des tubes (appelé le pas) permet par conséquent de moduler la puissance par unité de surface de la dalle : dans une salle de bains, un pas de 10 cm





(le rayon de courbure du tube limite le pas minimum vers 10 cm) fournit par exemple 90 W/m², un pas de 15 cm dans le séjour dissipe 60 W/m², tandis que les chambres avec un pas de 20 cm bénéficient de 45 W/m². Ces valeurs de pas nous ont expérimentalement donné des températures de pièces bien adaptées (avec 20 °C dans le séjour, la salle de bains est à 21 °C environ et les chambres à 18 °C), sans réglages de débit fastidieux au niveau des collecteurs.

Pour adopter ce principe, il convient d'équilibrer les longueurs de tous les circuits, de manière à avoir des pertes de charge homogènes et donc un débit identique dans chaque couronne (longueurs des couronnes identiques à 20 % près). Attention aussi aux revêtements de sols trop isolants : voir chapitre correspondant.

> **Bon à savoir**
>
> La densité de puissance maximum habituellement retenue pour les pièces de vie est de 70 W/m² et 90 W/m² pour la salle de bains ou le WC. De plus, les températures de surface du sol ne doivent pas dépasser 25 °C pour les pièces de vie et 28 °C pour la salle de bains ou le WC. La température maximale de l'eau admise dans la dalle est de 40 °C, avec temporairement des pointes possibles à 45 °C. Ces valeurs ne devraient jamais être atteintes avec un pas inférieur à 20 cm, une qualité de chape suffisamment conductrice et une habitation correctement isolée.

### *Comment calculer la température du sol ?*

La puissance échangée par un plancher chauffant est estimée à 11,6 W/m²K. Il est donc possible de déterminer la température du sol en fonction de la puissance surfacique injectée.

Exemple : si dT est la différence entre la température de surface du sol et la température dans la pièce ;

P la puissance par m² émise par le plancher ;

dT = P/11,6.

Pour P = 90 W/m² ; dT = 7,8 K. Donc, la température du sol est de 27,8 °C pour une température ambiante de 20 °C.

Ceci nous permet de fixer la plage de fonctionnement d'un plancher chauffant.

**ÉTUDE DE CAS**

**Soit une maison de 100 m² sur un niveau, avec hauteur sous plafond de 2,5 m et présentant un coefficient G = 1 (isolation correcte).**
**À partir de quelle température extérieure le plancher chauffant ne parvient-il plus à couvrir les besoins de chauffage ?**
**Puissance maximum dissipée par le plancher chauffant : 90 W/m² x 100 m² = 9 000 W.**
**G = 1, donc G x V = 250 W/K. C'est-à-dire qu'il faut 250 W pour élever la température de la maison de 1 K.**
**Pour 9 000 W, la différence de température = 9 000/250 = 36 K, soit 20 °C intérieur pour – 16 °C extérieur.**
**Que faire si la température extérieure est plus basse ?**
**– Adopter un chauffage d'appoint**
**– Améliorer l'isolation de la maison.**

Comprenons qu'il est, de ce fait, illogique que la pompe à chaleur fournisse beaucoup plus de puissance que ce que peut évacuer le plancher chauffant : 10 % de surpuissance suffit.

**Astuce**

Pour une bonne homogénéité de la température du sol, la pose du plancher chauffant à eau se fait en « escargot ». Ainsi, un tube aller (donc plus chaud) côtoie toujours un tube retour (donc moins chaud).

## Raccordement hydraulique de la pompe à chaleur sur le circuit plancher chauffant

Le volume total d'eau dans le plancher chauffant couplé thermiquement au béton suffit pour assurer un fonctionnement de la pompe à chaleur sans cycles trop courts. Le volume d'eau en circulation est généralement d'environ 8 litres/kW. Il n'est pas nécessaire d'ajouter un ballon tampon. La pompe à chaleur se raccorde donc directement aux circuits du plancher chauffant. Un seul circulateur est nécessaire. Attention aux vannes thermostatiques : toutes les boucles de plancher chauffant ne doivent pas en être équipées, afin de garantir un débit suffisant dans le circuit.





### *Calcul de l'inertie du plancher chauffant vu par la pompe à chaleur pour 1 kW de puissance*

La chaleur spécifique de l'eau est d'environ : 1,16 Wh/K.kg.

Pour 8 litres d'eau, il faut donc injecter 9,3 Wh pour faire varier l'eau de 1 K.

La chaleur spécifique du béton est d'environ : 0,24 Wh/K.kg. En prenant la puissance maximum de 90 W/m², 11 m² de dalle sont nécessaires pour dissiper 1 kW. Avec une épaisseur de 5 cm, le volume de cette dalle est : 0,55 m³. La densité du béton étant d'environ 2,4, la masse de cette dalle s'élève par conséquent à 1 320 kg. Il faut donc injecter 316,8 + 9,3 = 326,1 Wh pour faire varier la dalle et l'eau de 1 K. L'inertie de la dalle de béton est 34 fois supérieure à celle de l'eau contenue dans les tubes. Une inertie équivalente ne serait atteinte qu'avec une réserve de 281 litres d'eau/kW (2 810 litres pour une pompe à chaleur de 10 kW !).

L'ajout d'un ballon tampon n'a donc strictement aucun intérêt puisque son inertie est négligeable devant celle du plancher chauffant.

Le volume d'eau de 8 litres/kW est conforté par nos expériences. Le pas de pose maximum est de 20 cm pour conserver une qualité d'échange suffisante et le volume d'eau correspondant dans un tube PER 13/16 mm est de 7,3 litres/kW (dalle de 11 m²).

## Raccordement hydraulique sur le circuit plancher chauffant et radiateurs

Dans ce cas, deux températures d'eau différentes sont distribuées : environ 30 °C pour le plancher et 45 à 50 °C pour les

radiateurs. Le ballon tampon ou la bouteille de mélange est alors nécessaire. L'installation comporte trois circulateurs et une vanne trois voies : un circulateur propre à la pompe à chaleur, un circulateur et une vanne trois voies pour le plancher chauffant, un circulateur pour le circuit des radiateurs. La vanne trois voies est pilotée pour réguler la température d'eau du plancher (30 °C par exemple). Ce système est beaucoup plus onéreux que les précédents. La consommation de deux circulateurs supplémentaires grève la performance globale de l'installation ; la pompe à chaleur fonctionne à la température des radiateurs et non celle d'un plancher chauffant, d'où une baisse de sa performance significative, typiquement -20 % sur le COP pour un coût d'installation supérieur.

**RÉALISEZ DES ÉCONOMIES !**

**Une astuce économique mais anecdotique consiste à placer des radiateurs à faibles pertes de charge directement en sortie de pompe à chaleur (ils bénéficient de l'eau la plus chaude), puis le plancher chauffant est raccordé en série, utilisant l'eau moins chaude sortie de ces radiateurs. Dans ce cas, les radiateurs ne servent que d'appoint puisque leur surface est généralement insuffisante. Pour cette application, leur puissance est environ 1/3 de celle annoncée par le fabricant pour un dT de 50 K. Dans ce cas, la régulation est quasi impossible (sauf les « bypasser ») et c'est le plancher chauffant qui régule la pompe à chaleur. Un seul circulateur suffit. Un radiateur s che serviette de salle de bain est une application possible.**

Pour les personnes qui exigent des radiateurs, la solution la plus logique et la plus fiable reste celle qui utilise une pompe à chaleur à deux compresseurs : l'un fonctionne à haute température sur le circuit radiateurs, l'autre travaille à basse température pour alimenter le plancher chauffant. Le surcoût est dû au





compresseur et aux échangeurs supplémentaires (condenseur, évaporateur). Le capteur à eau glycolée est commun aux deux évaporateurs. La régulation est simplifiée, l'économie d'une vanne trois voies motorisée et d'un circulateur n'est pas négligeable, la souplesse d'utilisation est accrue puisque les deux zones de chauffage sont totalement indépendantes. Habituellement, le plancher chauffant est réservé aux pièces de jour tandis que les radiateurs sont placés dans les chambres. Ces dernières ont généralement des besoins énergétiques plus faibles que les pièces de jour. Le compresseur fonctionnant à haute température pour les radiateurs sera donc le moins puissant.

### *Quel revêtement de sol est-il possible de poser sur un plancher chauffant ?*

Le revêtement de sol ne doit pas présenter une résistance thermique trop importante : cela conduirait à augmenter la température de la dalle, donc la température de l'eau.

En pratique, les épaisseurs de revêtements sont souvent faibles et il y a peu de restrictions : les moquettes à longs poils seront évitées ; préférons les sous-couches pour parquets flottants ou sols stratifiés en bois compressé plutôt qu'en mousses plastique isolantes ou en liège ; les planchers traditionnels sur lambourdes sont bien évidemment totalement exclus puisque les vides d'air sont isolants.

En toute rigueur, les DTU fixent une résistance thermique des revêtements de sol maximum de 0,15 $m^2$.K/W. Les parquets flottants et sols stratifiés flottants ne devraient pas être posés sur sol chauffant. Cependant, nous connaissons des installations qui fonctionnent convenablement depuis de nombreuses années avec ce type de revêtement dans des chambres. La présence d'une sous-couche isolante est évidemment proscrite. L'augmentation de la température d'eau est partiellement compensée par une température ambiante des chambres souvent choisie vers 17 à 18 °C.

Sont conseillés les revêtements tels que : le carrelage, la pierre, les moquettes rases, les sols plastiques, le parquet collé (massif

d'épaisseur 15 mm maximum ou sur pli contrecollé). Il existe d'excellents parquets à coller spécifiques pour les planchers chauffants.

Les parquets sont incompatibles avec les planchers rafraîchissants à cause du risque de condensation. La température d'eau minimale en entrée d'un plancher rafraîchissant est de 18 °C.

# RESTITUTION DES CALORIES PAR ÉCHANGE FLUIDE/BÉTON

À l'instar de l'évaporateur, le condenseur peut échanger directement avec le milieu utile : des tubes de cuivre gainés de polyéthylène (protection contre la corrosion au contact du béton) constituant le condenseur sont noyés dans la chape de chauffage. Le fluide frigorigène se condense tout au long de son parcours dans la dalle. Lors de ce changement d'état, sa température reste donc sensiblement constante. Cela permet une pose des tubes toute simple, en « serpentin » plutôt qu'en « escargot ». Les longueurs des différentes couronnes doivent être rigoureusement identiques afin que leurs pertes de charges soient égales.

La régulation de température se fait par deux organes : le pressostat haute pression de la pompe à chaleur dont on ajuste la pression (donc la température) maximum de condensation et l'hystérésis, monté en série avec un thermostat d'ambiance.

La régulation des différents circuits est impossible. Pour différencier les températures des zones de nuit de celles des zones de jour, soit on module le pas des tubes (comme expliqué dans un plancher à eau), soit l'habitation est équipée de deux pompes à chaleur indépendantes : une pour les pièces de jour, une pour les pièces de nuit.

Ce dernier concept peut être poussé jusqu'à utiliser une petite pompe à chaleur par pièce. Hélas, la performance des petits compresseurs à pistons est très inférieure à celle des gros compresseurs Scroll. D'où une consommation globale énergétique moins intéressante. À l'heure de la course aux performances des pompes à chaleur (COP souvent > 4 en moyenne), ces installations multi-compresseurs sont pénalisées. L'usage de petits compresseurs rotatifs améliorerait les performances, mais leur prix est bien supérieur…





## Avantages

- Performance accrue par l'élimination d'un échangeur et du circulateur dont la consommation avoisine généralement 100 W.
- Coût intéressant dû à la simplification du plancher chauffant et de la pompe à chaleur.
- Bonne fiabilité, absence totale d'entretien : pas de problèmes de boues ni de purge dans le plancher chauffant, pas de liquide antigel.
- Régulation économique et efficace avec le pressostat HP et un simple thermostat d'ambiance.
- Possibilité d'utiliser les gaz surchauffés en sortie de compresseur (80 °C en moyenne) pour tempérer des pièces avec des ventilo-convecteurs ou pour chauffer de l'eau chaude sanitaire. Cette désurchauffe évite d'entrer dans la dalle avec des tubes trop chauds (voir ci-dessous).

## Inconvénients

- Le plancher chauffant est condamné à ne fonctionner qu'avec du fluide frigorigène car le diamètre des tubes est beaucoup trop petit pour faire circuler un débit suffisant d'eau.
- La température maximum d'un fluide dans un plancher chauffant est de 50 °C (règles DTU), or les gaz en sortie de compresseur sont surchauffés (voir ci-dessus). Souvent ce problème n'est pas réglé d'une façon satisfaisante, d'où une surchauffe dans la zone où les tubes pénètrent dans la chape de chauffage.
- Pas de régulation pièce par pièce (sauf avec la solution multi-compresseurs).

- Régulation d'ambiance en fonction de la température extérieure impossible, car il faudrait pour cela asservir la consigne du pressostat HP en fonction de la température extérieure. Ce type de pressostat n'existe pas à notre connaissance.
- Quantité de fluide frigorigène importante.
- Intervention d'un frigoriste pour braser les couronnes du condenseur et effectuer la charge en fluide frigorigène.

## Dimensionnement du condenseur de plancher chauffant

Le tube noyé dans la chape de chauffage est identique à celui servant à réaliser les évaporateurs en capteurs plans. Son diamètre est de 10 mm environ. Comme énoncé plus haut, la pose peut se faire en « serpentin ». Chaque couronne mesure au maximum 80 m afin de conserver des pertes de charges raisonnables. Les mêmes règles de densité de puissance que pour le plancher à eau s'appliquent : le pas de pose le plus serré fournira 90 W/m$^2$ au maximum. Vu qu'il est impossible de régler indépendamment la puissance fournie par les couronnes, le choix judicieux du pas s'impose. Cette solution limite le nombre de circuits à cause des difficultés de distribution du fluide et de l'épanouissement des tubes dans la chape Après le distributeur. Un condenseur de 4 couronnes est optimal, 6 couronnes proche du maximum.

Exemple de dimensionnement avec 6 couronnes :

Le pas dans les pièces de jour est souvent fixé à 20 cm. La longueur totale des 6 circuits de 80 m égale 480 m. Avec un pas de 20 cm, cela permet de chauffer 480 x 0,2 = 96 m$^2$. Avec une densité de puissance de 90 W/m$^2$, la puissance de la pompe à chaleur est de 8 640 W thermique.

Pour favoriser une haute température des gaz surchauffés en sortie de compresseur, celui-ci doit aspirer des gaz tempérés. Pour cela, il faut réchauffer le fluide gazeux en sortie de l'évaporateur en récupérant des calories sur le fluide liquide avant le détendeur. Un échangeur assure cette fonction en « sous-





**COMMENT ÉVITER DE FAIRE PÉNÉTRER DANS LA DALLE DU CHAUFFAGE LES GAZ SURCHAUFFÉS EN SORTIE DE COMPRESSEUR ?**

**Ces gaz véhiculent 10 à 15 % de la puissance de la machine à une température d'environ 80 °C. Il est possible de les utiliser pour un autre usage : tempérer une pièce avec des ventilo-convecteurs, chauffer de l'eau pour un circuit de radiateurs annexes, chauffer l'eau chaude sanitaire.**

**Un petit échangeur de chaleur (à air ou à eau) récupère les calories des gaz surchauffés afin d'abaisser leur température. Cet échangeur placé en amont du plancher chauffant doit être dimensionné soigneusement de manière à ne pas condenser le fluide.**

**Dans le cas d'échangeurs à eau, cette puissance pourra servir à chauffer un ballon à eau chaude à une température d'eau de 60 à 70 °C en hiver, et 30 à 50 °C en demi-saison. Le reste du temps un autre moyen (résistance électrique, capteurs solaires) est nécessaire pour obtenir de l'eau chaude sanitaire à 55 °C minimum.**

**Dans le cas d'échangeurs à air, cette puissance pourra servir par exemple à tempérer des pièces qui ne bénéficient pas du plancher chauffant (chambres, buanderie, atelier...). Plusieurs échangeurs peuvent être montés en parallèle.**

**Reprenons l'exemple précédent avec 6 circuits et 90 W/m$^2$. Calculons la nouvelle puissance de la pompe à chaleur sachant que l'on prélève 15 % pour chauffer 2 chambres.**

**La nouvelle puissance = 8 640/0,85 = 10 165 W.**

**La puissance dans chaque chambre est :**

**(10 165 x 0,15)/2 = 762 W.**

refroidissant » le liquide et en augmentant la surchauffe des gaz à l'aspiration.

Attention toutefois à ne pas dépasser la température maximale de refoulement indiquée par le fabricant de compresseur (en général environ 115 °C).

# 4 La protection électrique des pompes à chaleur

Comme tout appareil électrique, une pompe à chaleur doit être alimentée par un circuit protégé (disjoncteurs courbe D ou fusibles aM, prévus spécialement pour accepter le courant de démarrage des moteurs). Les machines monophasées sont alimentées par un câble 3 conducteurs : Phase, Neutre et Terre. Les pompes à chaleur triphasées sont connectées à 5 conducteurs : Phase 1, Phase 2, Phase 3, Neutre et Terre.

La présence du compresseur et son prix élevé nécessitent en plus une protection moteur spécifique de type relais thermique (ou éventuellement disjoncteur moteur réglable en calibre). Le réglage en courant du relais thermique se fait en fonction du point de fonctionnement du compresseur, dans les conditions les plus contraignantes (pression de condensation maximum).

Ainsi, il devient très improbable de griller le compresseur. Cela est primordial pour la fiabilité de toute l'installation, vue la pollution du circuit frigorifique que provoque la destruction des bobinages du moteur (rinçage du circuit frigorifique nécessaire).

**ATTENTION À LA PROTECTION CONTRE LES SURINTENSITÉS ET SURCHAUFFES !**

**La protection contre les surchauffes et surintensités intégrée dans la plupart des compresseurs hermétiques ne suffit pas toujours car elle est réarmable automatiquement et n'agit pas sur le circuit de commande. En l'absence d'intervention manuelle, cela conduit à faire fonctionner le compresseur cycliquement sur défaut jusqu'à destruction soit des bobinages, soit de la protection elle-même.**





**Section des conducteurs d'alimentation et protections associées en monophasé**

| Puissance absorbée | Section de conducteurs | Calibre disjoncteur courbe D | Calibre relais thermique |
|---|---|---|---|
| 1 200 W à 2 000 W | 2,5 mm² | 16 A | 6 – 10 A |
| 2 000 W à 2 800 W | 4 mm² ou 6 mm² | 20 A | 9 – 14 A |
| 2 800 W à 3 500 W | 6 mm² | 25 A | 13 – 18 A |
| 3 500 W à 4 000 W | 6 mm² | 32 A | 2 fois 6 – 10 A * |
| 4 000 W à 5 600 W | 10 mm² | 40 A | 2 fois 9 – 14 A * |

* Les compresseurs montés en tandem poss dent un relais thermique et un contacteur chacun, avec décalage de l'instant de démarrage afin de limiter l'appel de courant.

**Section des conducteurs d'alimentation et protections associées en triphasé**

| Puissance thermique | Section de conducteurs | Calibre disjoncteur courbe D | Calibre relais thermique |
|---|---|---|---|
| 1 400 W à 2 200 W | 2,5 mm² | 6 A | 2,5 – 4 A |
| 2 200 W à 3 500 W | 2,5 mm² | 10 A | 4 – 6,3 A |
| 3 500 W à 5 500 W | 2,5 mm² | 16 A | 6 – 10 A |
| 5 500 W à 7 500 W | 4 mm² ou 6 mm² | 20 A | 9 – 14 A |

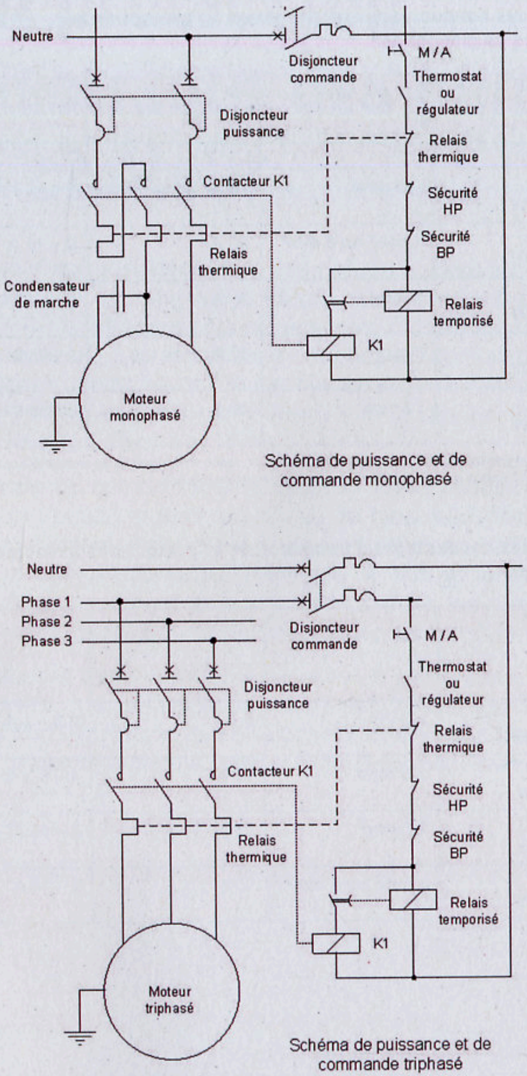



Schéma de puissance et de commande monophasé

Schéma de puissance et de commande triphasé

*Fig. 4.1 – Schémas électriques mono et triphasés*





Nous conseillons aussi une protection contre la foudre de type parafoudre (limiteur de surtensions) en tête de l'installation électrique. La foudre tombant sur une ligne électrique provoque une sévère surtension qui peut griller le compresseur. Ce claquage diélectrique (arc électrique interne) du moteur n'entraîne pas de pollution du circuit frigorifique, mais nécessite cependant le remplacement du compresseur. La protection, installée par un électricien professionnel, dans le tableau électrique de l'habitation, est bien sûr à la charge du propriétaire.

Une temporisation anticourts cycles empêche le redémarrage du compresseur Après un arrêt, même fugitif (microcoupures sur le réseau électrique > 50 ms). Une temporisation d'au moins 10 mn permet aux pressions (HP et BP) de s'équilibrer afin que le compresseur ne redémarre pas en pleine charge : le moteur resterait calé. Notez que cette temporisation n'agit pas en cas de déclenchement de la protection intégrée au compresseur, car cette dernière agit directement sur le circuit de puissance et non sur la commande.

Enfin, voici une dernière recommandation pour parfaire le circuit électrique d'une pompe à chaleur : la temporisation anticourts cycles peut avantageusement être remplacée par un dispositif (relais de contrôle de compresseur) qui intègre en plus une protection contre les sous-tensions. Cet appareil est particulièrement utile pour les habitations en bout de ligne, quand le réseau électrique subit de fortes variations de tension transitoires. Ainsi, le compresseur s'arrête automatiquement lorsque la tension d'alimentation est trop basse (180 V par exemple pour un réseau 230 V).

Hélas, à notre connaissance, les fabricants de pompes à chaleur destinées au marché domestique n'ont pas intégré à l'heure actuelle ces protections (protection contre les sous-tensions et relais thermique).

Après avoir étudié Les échanges de chaleur côtés source froide et source chaude, voyons les combinaisons judicieuses pour réaliser une pompe à chaleur.

PARTIE 2

# LES DIFFÉRENTS TYPES DE POMPES À CHALEUR

# 5 Les différentes combinaisons

## POMPE À CHALEUR AIR/AIR

Voici, sans doute, le type de machine le plus répandu : c'est le principe de tous les réfrigérateurs à compression, des climatiseurs (monoblocs mobiles ou *split*) de nombreuses petites banques réfrigérantes.

Les deux échangeurs sont de type air/fluide, le plus souvent ventilés afin de limiter l'encombrement et augmenter l'efficacité. Pour les pompes à chaleur de petites puissances (< 5 kW), le circuit frigorifique est très simple et contient peu de fluide (< 2 kg).

Le travail du frigoriste intervient pour la mise en service. Il effectue simplement le raccordement et le tirage au vide des liaisons frigorifiques entre l'unité externe et l'échangeur interne. Il n'est pas nécessaire d'ajouter du réfrigérant lorsque les liaisons sont relativement courtes. Les performances de la pompe à chaleur seront strictement conformes à celles annoncées par le fabricant. Ces appareils sont souvent appelés *split* puisqu'une unité extérieure peut être couplée avec plusieurs éléments intérieurs destinés à distribuer la chaleur (ou la fraîcheur).

La variation de vitesse est très bien adaptée et fonctionne parfaitement. Un asservissement régule le régime de rotation du compresseur en fonction de la température extérieure et de la différence entre la température ambiante et la consigne demandée. La faible inertie thermique que présentent les échangeurs (évaporateur et condenseur à air) avec leur ambiance favorise la stabilité de l'asservissement, ainsi la régulation fonctionne





bien. Certains fabricants ont conçu des compresseurs spécialement destinés à être pilotés par des variateurs de vitesse.

Les pompes à chaleur air/air sont souvent réversibles : elles assurent la fonction climatisation. L'évaporateur extérieur devient condenseur et le condenseur intérieur devient évaporateur avec la fonction déshumidification de l'air qui apporte le confort en été.

Point de fonctionnement habituel pour une température extérieure de – 7 °C :

- Évaporation vers –10 à –13 °C.
- Condensation vers 35 à 40 °C.
- COP moyen : 2,5 à 3

## POMPE À CHALEUR AIR/EAU

Ce choix se justifie souvent en rénovation dans les régions tempérées de France (H2 et H3). La pompe à chaleur fonctionnant avec un fluide frigorigène adapté aux hautes températures (le R134a par exemple), ou à cycle EVI, vient remplacer une ancienne chaudière couplée à des radiateurs à eau. Une résistance d'appoint complète la baisse significative de performance par grand froid.

Les machines peuvent être l'association de l'unité extérieure d'un split avec un plancher chauffant, ou des pompes à chaleur monoblocs. Pour l'utilisation sur plancher chauffant, la pompe à chaleur produit de l'eau à basse température. Cette configuration s'applique par exemple à une habitation neuve ou récente sur un petit terrain inexploitable pour un capteur enterré.

Ces pompes à chaleur comportent un évaporateur à air et un condenseur à eau. Le circuit frigorifique est simple et contient peu de fluide (autour de 2 kg). L'intervention du frigoriste est similaire au cas précédent, avec également du travail de plomberie. Les performances finales dépendent du bon dimensionnement du circuit hydraulique par rapport au groupe frigorifique fabriqué et chargé en usine.

La variation de vitesse est intéressante. La régulation doit se faire sur la température extérieure, afin d'optimiser le fonctionnement de l'évaporateur et de limiter la fréquence des phases de dégivrage. Pour conserver les bonnes performances de la variation de vitesse sur les pompes à chaleurs à condenseur fluide/eau, la régulation doit être adaptée à l'inertie thermique de l'eau. Dans le cas contraire (régulateur paramètré pour de l'air et utilisé pour l'eau), le compresseur fonctionne en tout ou rien.

En région froide (H1) et humide, le givrage de l'évaporateur est tel que les périodes de dégivrage deviennent beaucoup trop consommatrices d'énergie, ce qui contribue à ruiner la performance globale (plusieurs minutes de dégivrage toutes les heures ou 10 % du temps, et parfois beaucoup plus par temps de brouillard). Des ailettes très espacées améliorent ce point, mais au détriment de la compacité. La résistance électrique d'appoint risque de fonctionner très souvent…

Le dimensionnement se fait pour une température extérieure de – 7 °C. À cette température la pompe à chaleur doit fournir entre 0,5 et 0,7 fois les déperditions de l'habitation à la température minimale de base. La résistance d'appoint fournit le complément d'énergie avec 20 % de surpuissance.

Par exemple, dans une zone climatique où la température de base est – 10 °C et si l'habitation a 10 kW de déperditions à cette température, la pompe à chaleur et la résistance d'appoint sont dimensionnées de la façon suivante :

- Puissance de la pompe à chaleur pour – 7 °C extérieur = 6 kW. Il faut donc respecter ce critère à l'achat.
- Puissance de la pompe à chaleur pour – 10 °C extérieur = 5 kW. La résistance d'appoint fournit donc : (10 kW x 1,2) – 5 kW = 7 kW.

Pour couvrir 100 % des déperditions par – 10 °C il aurait fallu une machine presque deux fois plus puissante, donc beaucoup plus chère uniquement pour satisfaire les besoins thermiques de quelques jours par an. Par temps doux, les cycles de fonctionnement seraient sans doute trop courts : par + 10 °C extérieur cette pompe à chaleur est 7 fois trop puissante !





Notons que la résistance d'appoint peut-être remplacée par un autre moyen de chauffage, tel qu'une chaudière en relève ou un poêle à bois…

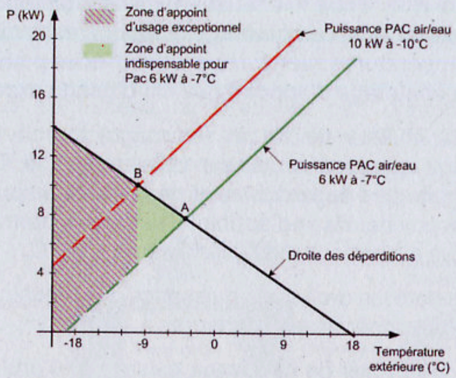



*Figure 5.1 – Comparaison du dimensionnement de deux pompes à chaleur aérothermiques*

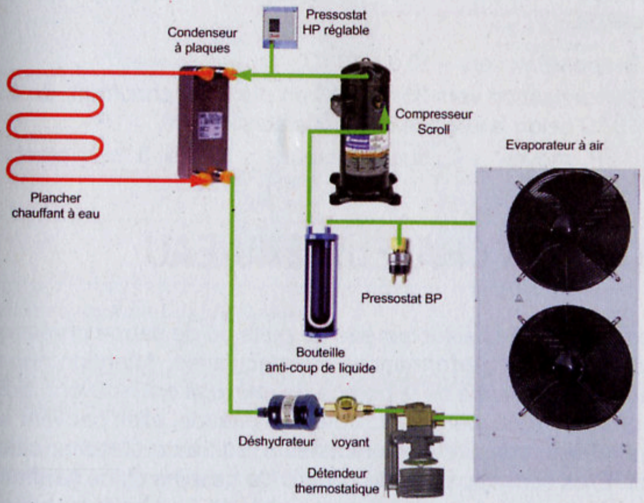



*Fig. 5.2 – Synoptique d'une PAC air/eau*

La pompe à chaleur de 6 kW (en vert, figure 5.1) fournit 100 % des besoins jusqu'à une température extérieure d'environ – 4 °C (intersection de la droite des déperditions et de la droite de puissance au point A). Entre – 4 °C et – 10 °C (température de base de la zone climatique) un chauffage d'appoint est indispensable. Pour des températures inférieures à – 10 °C, nous pouvons considérer qu'un chauffage d'appoint devient d'usage exceptionnel.

La pompe à chaleur de 10 kW (en rouge) fournit 100 % des besoins jusqu'à une température extérieure de – 10 °C (intersection de la droite des déperditions et de la droite de puissance au point B). Aucun chauffage d'appoint n'est requis hormis pour des températures exceptionnelles inférieures à – 10 °C.

Nous avons noté les droites de puissance des machines en pointillés pour les températures inférieures à – 7 °C.

Les effets des cycles de dégivrage ne sont pas pris en compte sur ce graphique puisqu'ils dépendent étroitement du climat où est installé la pompe à chaleur.

Point de fonctionnement habituel pour une température extérieure de – 7 °C :

- Évaporation vers – 10 à – 13 °C.
- Condensation vers 35 à 40 °C en plancher chauffant, de 45 à 55 °C selon la surface des radiateurs.
- COP moyen : 2 sur radiateurs ; 2,5 à 3 sur plancher chauffant.

## POMPE À CHALEUR EAU/EAU

Ces pompes à chaleur sur eau de puits ou de nappe phréatique présentent des performances spectaculaires. Attention cependant à la puissance de la pompe de relevage qui, souvent, grève le bilan énergétique global. Côté eau chaude, elles peuvent soit être reliées à un circuit de radiateurs, soit à un plancher chauffant. Elles sont capables de couvrir les besoins d'une habitation dans toutes les régions, même en altitude. Le circuit frigorifique reste simple avec une petite quantité de fluide (autour de 2 kg).





Ces pompes à chaleur, dont le circuit frigorifique est entièrement réalisé et chargé en usine, peuvent être installées par toute personne ayant de bonnes connaissances en plomberie et en électricité. Les performances obtenues sont conformes à celles annoncées par le fabricant si les circuits d'eau froide et chaude sont correctement dimensionnés.

La variation de vitesse ne présente pas d'intérêt puisque l'échange avec la source froide est excellent. De surcroît, si l'eau est abondante, la puissance fournie par la source froide est très supérieure à ce que l'évaporateur est capable de prélever.

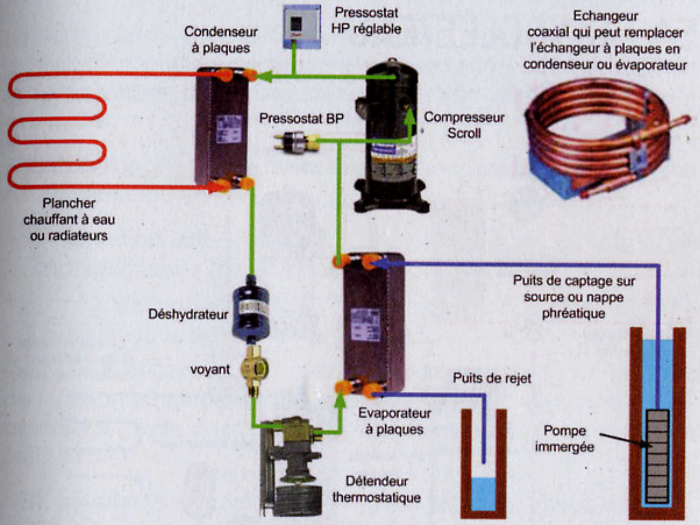



*Fig. 5.3 – Synoptique d'une PAC eau/eau*

Point de fonctionnement habituel indépendant de la température extérieure :

- Évaporation vers + 2 à + 8 °C selon la température de l'eau utilisée comme source froide.
- Condensation vers 35 à 40 °C en plancher chauffant, de 45 à 55 °C selon la surface des radiateurs.

Le dimensionnement se calcule habituellement pour le point de fonctionnement avec l'eau à 10 °C en entrée d'évaporateur et 35 °C en sortie de condenseur, dans le cas d'un plancher chauffant.

COP moyen : 4 sur radiateurs à 5,5 sur plancher chauffant. Ces valeurs peuvent être inférieures si le relevage de l'eau nécessite une pompe de forte puissance comparée à la puissance absorbée par le compresseur.

## POMPE À CHALEUR EAU GLYCOLÉE/EAU

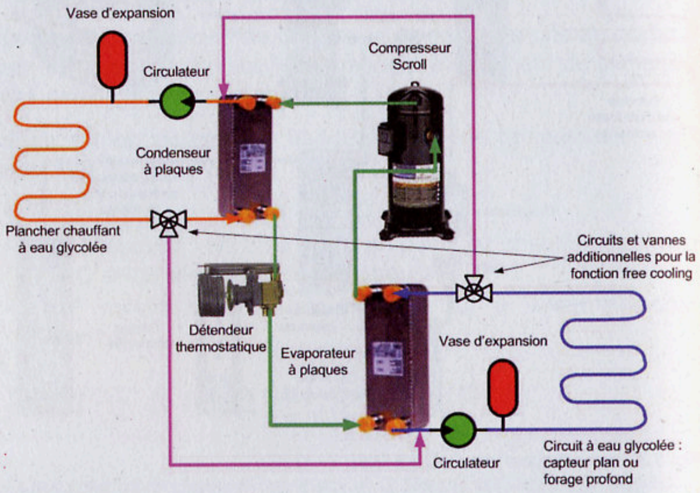



*Fig. 5.4 – Synoptique d'une PAC eau glycolée/eau*

Ces machines sont identiques aux précédentes du point de vue du circuit frigorifique et de l'installation. Mais leurs performances sont légèrement moins bonnes et moins prévisibles à cause du captage dans la terre (capteur plan ou puits vertical). Couplées





à un plancher chauffant basse température, les performances globales restent très bonnes pour couvrir 100 % des besoins, quelle que soit la zone climatique. Le chauffage par radiateurs est possible si ceux-ci sont largement dimensionnés pour fonctionner à basse température.

L'option réversibilité par inversion de cycle est souvent proposée. Le plancher chauffant devient alors plancher rafraîchissant. Nous préférons le principe du *free cooling* (voir dessin), certes un peu moins efficace, mais beaucoup plus économique et plus fiable que l'inversion du cycle frigorifique : le compresseur est arrêté, seuls les circulateurs fonctionnent.

La variation de vitesse du compresseur permet d'optimiser la qualité d'échange avec la terre. La régulation doit se faire sur la température d'eau chaude en fonction de la température extérieure.

Point de fonctionnement habituel indépendant de la température extérieure :

- Évaporation vers – 5 à – 8 °C selon la nature du terrain en captage plan. + 2 à – 3 °C en forage profond.
- Condensation vers 35 à 40 °C en plancher chauffant, de 45 à 55 °C selon la surface des radiateurs.

Le dimensionnement se calcule habituellement pour le point de fonctionnement avec l'eau glycolée à – 5 °C en sortie d'évaporateur et l'eau d'un plancher chauffant à 35 °C en sortie de condenseur.

COP moyen : 3 sur radiateurs à 4,5 sur plancher chauffant.

## POMPE À CHALEUR SOL/EAU

Nommons ainsi les pompes à chaleur dont l'évaporateur est un échangeur fluide/terre sous forme de capteur plan. Ces machines présentent en théorie de meilleures performances que celles avec capteur plan à eau glycolée : suppression d'un échangeur et d'un circulateur. Par contre, le circuit frigorifique est plus complexe et

contient une quantité relativement importante de fluide frigorigène (5 à 10 kg environ selon la puissance). L'intervention d'un frigoriste chevronné est indispensable puisqu'une partie de la pompe à chaleur est assemblée sur le chantier : raccordement du distributeur de liquide en aval du détendeur, brasures des entrées de couronnes sur les brins du distributeur de liquide, brasures des sorties de couronnes sur le collecteur d'aspiration. Selon les règles de l'art, toutes ces brasures devraient être réalisées sous flux d'azote afin d'éviter les dépôts de calamine. Avant la mise en service, il convient ensuite de mettre le circuit frigorifique sous pression d'azote pour détecter d'éventuelles fuites. L'installation est alors longuement tirée au vide (compter 1 heure/kW) pour éliminer parfaitement les traces d'humidité, puis chargée en fluide frigorigène. Après quelques semaines de fonctionnement hivernal, le frigoriste peut être amené à ajuster la charge en réfrigérant et à régler le détendeur thermostatique.

Ces contraintes d'organisation tendent à réduire le marché des pompes à chaleur sol/eau au profit des machines eau glycolée/eau.

Lorsque les règles de l'art sont respectées, ces pompes à chaleur sol/eau rassemblent des avantages majeurs :

- Performance excellente (COP supérieur à 4, même en période froide) grâce à l'évaporateur enterré.
- Souplesse de régulation dans l'habitation grâce à l'eau dans le plancher chauffant.

Les pompes à chaleur sol/eau entièrement conçues, assemblées et chargées en usine, doivent logiquement intégrer de manière reproductible les règles de l'art et simplifier largement le travail de mise en service des installateurs : il suffit de déployer et répartir les couronnes de l'évaporateur sur le terrain. La pompe à chaleur prend place à l'extérieur de l'habitation. Les canalisations entre la machine et l'habitation doivent être soigneusement isolées et le fluide caloporteur pour le plancher chauffant ou les radiateurs doit être antigel.

Les performances attendues sont alors au rendez-vous et ne dépendent plus que de la nature du sol au contact des tubes.





La variation de vitesse du compresseur permet d'optimiser la qualité d'échange avec la terre. La régulation doit se faire sur la température d'eau chaude, en fonction de la température extérieure.

Point de fonctionnement habituel indépendant de température extérieure :

- Évaporation vers – 5 à – 8 °C selon la nature du terrain.
- Condensation vers 35 à 40 °C en plancher chauffant, de 45 à 55 °C selon la surface des radiateurs.

Le dimensionnement se calcule habituellement pour le point de fonctionnement avec l'évaporation du fluide à – 5 °C et la température d'eau à 35 °C en sortie de condenseur, dans le cas d'un plancher chauffant.

COP moyen : 3 sur radiateurs à 4 sur plancher chauffant.

### QUELQUES RÈGLES DE CONCEPTION POUR LE CAPTEUR EXTÉRIEUR

**La différence très importante de volume entre l'évaporateur et le condenseur rend le fonctionnement du détendeur délicat.**
**Le détendeur thermostatique présente l'avantage, par rapport au détendeur capillaire, d'asservir la surchauffe des gaz en sortie d'évaporateur à une valeur prédéterminée réglable (5 à 7 K généralement) ce qui assure l'utilisation optimale de l'évaporateur sur une grande plage de température. Pour cela, il injecte un débit de réfrigérant variable en comparant la pression dans l'évaporateur (avec une membrane métallique) à la température de surchauffe (avec un bulbe plaqué contre le tuyau de sortie de l'évaporateur). Le mauvais fonctionnement du détendeur se traduit souvent par des oscillations de la pression dans l'évaporateur et il en découle une forte instabilité de la température de surchauffe. Il y a risque de coups de liquide.**

Le bas du compresseur peut givrer ou au contraire chauffer excessivement. Dans tous les cas, les performances de l'installation sont dégradées et la fiabilité de l'installation aléatoire. Autre mauvais fonctionnement du détendeur observé : l'installation est sous-chargée en fluide frigorigène, le détendeur voit passer du gaz, il ne peut réguler correctement et la surchauffe est trop importante. Là encore, les performances de l'installation sont dégradées.
Pour obtenir de bons résultats sur le capteur enterré, la distribution régulière et homogène du réfrigérant dans chaque couronne est primordiale. Encore faut-il suivre rigoureusement les spécifications du fabriquant de détendeur.
Remarque : des problèmes de répartition du fluide frigorigène peuvent aussi se produire dans les évaporateurs à air de grandes dimensions. Ce cas s'observe lorsque le givrage ne se répartit pas uniformément sur l'évaporateur.
Un fabricant de matériel frigorifique mondialement réputé préconise, par exemple : le distributeur de liquide est monté verticalement à environ 10 à 20 cm sous le détendeur. Côté aspiration, la collecte des gaz issus de chaque couronne doit comporter des pertes de charge minimales (pas de rétrécissement de diamètre en fin de couronnes). Autre condition pour tirer le meilleur parti du capteur : le détendeur doit fonctionner régulièrement et être alimenté exclusivement en liquide (pas de « flash gaz »). Ici encore, pour que l'asservissement de la surchauffe fonctionne bien, il faut respecter les consignes données par le fabriquant du détendeur : chaque brin de l'évaporateur relié au distributeur de liquide présente une perte de charge, généralement de 0,5 à 1 bar. Ainsi le gain d'asservissement du détendeur est limité et les risques d'oscillations de la surchauffe sont maîtrisés. Le détendeur pour ce type d'évaporateur à fortes pertes de charge





comporte un petit tube d'égalisation de pression externe placé en aval de l'emplacement du bulbe.
Le bulbe, monté sur une conduite horizontale immédiatement en sortie d'évaporateur, se fixe angulairement entre 1 h et 4 h. Son contact thermique avec le tube peut être amélioré par de la graisse conductrice.
Un capillaire en parallèle sur le détendeur améliore aussi la stabilité de l'asservissement de la surchauffe (diminution du gain), puisque le débit de fluide ne peut plus être nul. Dans ce cas, une électrovanne placée en amont du détendeur évite toute migration du fluide vers l'évaporateur pendant les arrêts prolongés de la pompe à chaleur.
Le détendeur électronique résout efficacement les problèmes d'instabilité de la surchauffe, mais son prix reste élevé.

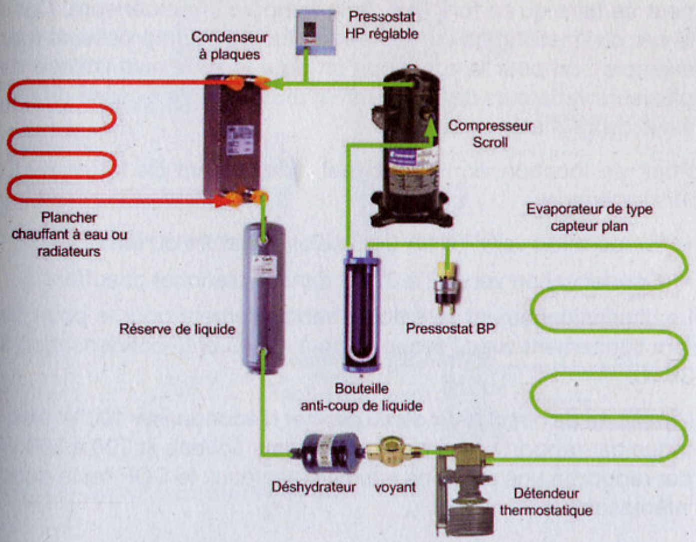



*Fig. 5.5 – Synoptique d'une PAC sol/eau*

# POMPE À CHALEUR SOL/SOL

Ces machines sont strictement identiques aux précédentes pour la partie évaporateur enterré. Par contre, le condenseur est composé de couronnes de cuivre gainé noyées dans les dalles. Le circuit frigorifique contient une grande quantité de fluide frigorigène (10 à 20 kg selon la puissance). La suppression du condenseur améliore la performance. Cependant, l'énergie des gaz surchauffés en sortie de compresseur, souvent inexploitée, et l'impossibilité de réguler les pièces indépendamment nuisent au confort et à une utilisation économique du chauffage. L'installation et la mise en service de ces pompes à chaleur demandent une intervention longue du frigoriste : il devra réaliser les brasures des couronnes du condenseur et de l'évaporateur sur le chantier.

La variation de vitesse du compresseur permet d'optimiser la qualité d'échange avec la terre. Par contre, la régulation ne peut se faire qu'en fonction de la température extérieure. Dans le cas où l'installation comporterait plusieurs compresseurs (par exemple : un pour la zone jour, un pour la zone nuit) l'usage de plusieurs variateurs de vitesse n'est plus rentable à cause du prix élevé de ce matériel.

Point de fonctionnement habituel indépendant de la température extérieure :

- Évaporation vers – 6 à – 9 °C selon la nature du terrain.
- Condensation vers 32 à 37 °C dans le plancher chauffant.

Le dimensionnement se calcule habituellement pour le point de fonctionnement avec l'évaporation à – 5 °C et la condensation à 35 °C.

L'absence de circulateur d'eau permet d'économiser 100 W électrique par rapport à une pompe à chaleur sol/eau et 200 à 300 W par rapport à une machine eau glycolée/eau : le COP reste donc intéressant.

Remarque concernant les températures d'évaporation : pour les pompes à chaleur eau glycolée/eau, les températures d'évaporation sont souvent identiques, voire légèrement supérieures à celles relevées sur les machines sol/eau ou sol/sol, du fait du large dimensionnement habituel des capteurs à eau glycolée (les tubes en polyéthylène ont un plus gros diamètre que les tubes en cuivre gainé).





COP moyen : 4

Le surdimensionnement d'un capteur plan à eau glycolée ne pose aucun problème et ne peut être que bénéfique. Au contraire, pour les capteurs à fluide frigorigène, il faut trouver un bon compromis : le capteur trop petit posera des problèmes d'évaporation trop basse. Le capteur trop grand comportera des pertes de charges trop importantes et/ou une mauvaise répartition du réfrigérant dans les circuits et/ou des problèmes de retour d'huile au compresseur.

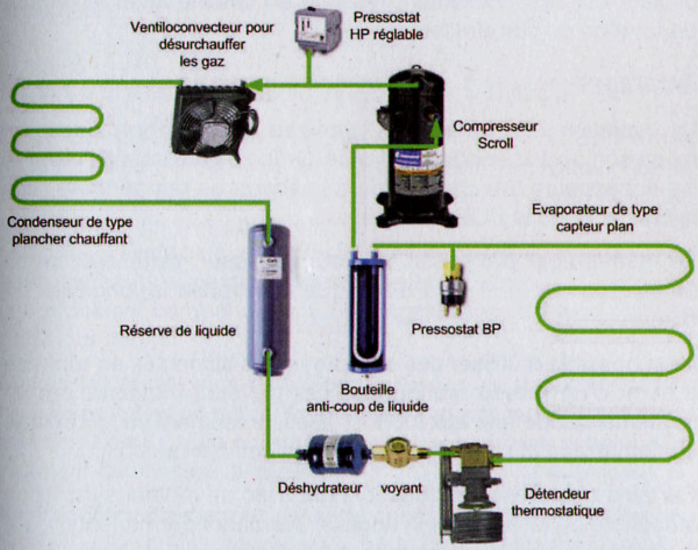



*Fig. 5.6 – Synoptique d'une PAC sol/sol*

# LES POMPES À CHALEUR À PUISSANCE VARIABLE

La variation de puissance des compresseurs procure un intérêt majeur dans le cas où les échangeurs présenteraient une résistance thermique élevée par rapport au média avec lequel ils travaillent (essentiellement l'air et la terre). Cela permet d'améliorer significativement le COP en mi-saison lorsque le besoin en puissance de chauffage est modeste.

## La variation de vitesse des compresseurs

À l'heure actuelle, la variation de puissance des pompes à chaleur est essentiellement réalisée en faisant varier le régime de rotation du compresseur.

### *Avantages*

La variation de puissance améliore les performances en mi-saison ou en période peu froide. Grâce à la puissance réduite, les échangeurs travaillent avec des écarts de température plus faibles et donc le COP est amélioré.

Le démarrage progressif du compresseur évite les creux de tension sur le réseau électrique et favorise la longévité du compresseur.

Il est possible d'utiliser des compresseurs alimentés en triphasé à partir d'un réseau monophasé (les moteurs triphasés ont un rendement supérieur aux monophasés, présentent un fort couple au démarrage et ne nécessitent aucun condensateur).

Certains compresseurs fonctionnent avec un moteur synchrone autopiloté ou brushless (en anglais) à aimants permanents, dont le rendement et la compacité sont remarquables (appellation commerciale *DC inverter*, par opposition à *AC inverter*, qui utilise un variateur de vitesse alimentant un moteur asynchrone). Ces moteurs synchrones intègrent obligatoirement une commande électronique de pilotage à vitesse variable.





### *Inconvénients*

Tous les compresseurs n'acceptent pas de tourner à vitesse très réduite, à cause de la lubrification. L'amplitude de la variation de puissance est généralement réduite entre 40 % et 120 %.

L'ajout de matériel supplémentaire embarquant de l'électronique de puissance peut être source de panne et doit être correctement filtré pour limiter l'injection de perturbations électromagnétiques sur le réseau électrique.

Le variateur doit améliorer significativement la performance et son rendement propre doit être excellent pour être amorti.

L'asservissement de la vitesse n'est pas facile à réaliser et diffère selon les types de pompes à chaleur (air/air ou air/eau). Or, si la régulation n'est pas parfaitement réglée, le principe perd tout son intérêt.

## Les compresseurs montés en tandem

Deux compresseurs de puissances identiques ou différentes sont installés en parallèle permettant aussi l'adaptation de la puissance de la pompe à chaleur au besoin de chauffage. Les lois de pilotage des compresseurs sont simples et ne nécessitent pas d'électronique sophistiquée. Par contre, la puissance varie par sauts et ne peut être ajustée en continu. Les compresseurs doivent comporter un tube d'égalisation du niveau d'huile dans leur carter.

Malgré la présence de deux compresseurs, ce système robuste ne présente pas un surcoût significatif par rapport aux solutions inverter. Le prix d'un compresseur est comparable à celui d'un variateur de vitesse de qualité.

Les tandems permettent aussi de conserver un contrat d'abonnement électrique monophasé, pour des puissances élevées jusqu'à 20 kW thermique.

La variation de vitesse tend à supplanter les montages en tandem.

## Variation de puissance des compresseurs par le système Digital Scroll

Ce nouveau principe permet aussi une variation de puissance du compresseur, mais celle-ci intervient mécaniquement : un jeu axial d'1 mm entre les deux spirales agit comme une soupape de décharge. Ce jeu en translation piloté rend étanches ou non les spirales du compresseur. Selon la position de la spirale, le compresseur délivre une puissance maximum ou nulle. La spirale est commandée électriquement par des impulsions de largeur calibrée et avec une période de 30 secondes au maximum. La puissance moyenne du compresseur peut ainsi varier de 10 % à 100 %.

### *Avantages*

- Grande plage de variation de puissance.
- Pas de problème de lubrification, puisque le moteur tourne toujours à sa vitesse nominale.
- Simplicité de la commande électrique.
- Démarrage du compresseur sans pression.
- Pas de perturbations électromagnétiques hautes fréquences envoyées sur le réseau.

### *Inconvénients*

- Le moteur consomme toujours un fort courant au démarrage (6 à 8 fois le courant nominal).
- Pendant le délestage en pression, le moteur du compresseur consomme effectivement peu de puissance active mais essentiellement de la puissance réactive. Celle-ci peut être taxée par le distributeur d'énergie qui continue à fournir du courant (réactif dans ce cas).
- La translation doit pouvoir supporter des millions de manœuvres.

Comment se comportent les différents circuits frigorifiques lorsque le réfrigérant ne circule plus de façon continue ? La bouteille de réserve de liquide devient indispensable et doit être





largement dimensionnée pour assurer une fonction de tampon et alimenter le détendeur sans à-coups de pression.

# LA RÉGULATION DU CHAUFFAGE PAR POMPE À CHALEUR

## Choix de la régulation de chauffage

Quelle régulation de chauffage choisir pour une habitation chauffée par une pompe à chaleur ? Quelle puissance de machine choisir ?

Contrairement aux autres modes de chauffage (chaudière à gaz, fuel, bois...) une pompe à chaleur est sélectionnée impérativement avec une faible surpuissance par rapport aux besoins énergétiques de l'habitation (10 % à 20 % maximum). Les calculs de déperditions des habitations sont souvent légèrement surestimés. Si le chauffagiste prend trop de marge, il en résulte un fonctionnement de la pompe à chaleur à trop haute température et avec des temps de marche trop courts. La régulation s'en trouve complexifiée et l'ajout d'un ballon tampon devient nécessaire. Tout cela va à l'encontre d'un système simple, fiable et économique.

Si, au contraire, la pompe à chaleur n'est pas surdimensionnée, la régulation de température est aisée : les montées en température sont lentes, surtout si la construction présente une forte inertie thermique. Les dépassements de température de consigne restent donc limités. Le confort est meilleur.

## Le thermostat et la temporisation réglable

La régulation la plus simple utilisera uniquement un thermostat d'ambiance. Celui-ci, placé selon les recommandations du fabricant, devra présenter une hystérésis d'au moins 0,5 K pour laisser la pompe à chaleur fonctionner pendant un temps suffisamment long.

Remarque : les thermostats d'ambiance « chronoproportionnels » sont à proscrire absolument : les temps de marche et d'arrêt ne sont que de quelques dizaines de secondes à quelques minutes, donc inadaptés au contrôle d'une pompe à chaleur. Par contre, ces appareils conviennent bien pour piloter les moteurs thermiques des boucles de planchers chauffants, pour la régulation indépendante des chambres par exemple.

Les problèmes des cycles de fonctionnement courts des pompes à chaleur sont les suivants :

- Échauffement du moteur dû à la surintensité (6 à 8 fois le courant nominal) du démarrage.
- Mauvaise performance de l'installation car il faut plusieurs dizaines de secondes à quelques minutes (temps variable en fonction de la quantité de réfrigérant) pour que les pressions de fonctionnement s'établissent et que le détendeur régule correctement le débit de réfrigérant. Pendant cette phase transitoire, le COP est bien inférieur à celui du régime établi.
- Fatigue mécanique du compresseur à chaque démarrage. Ce dernier point est surtout critique pour les compresseurs à pistons qui nécessitent une lubrification efficace. Or, c'est au démarrage que la lubrification est la moins bonne. (Les compresseurs Scroll sont nettement moins sensibles aux problèmes de lubrification.)

Pour fixer les idées, retenons que des cycles de fonctionnement trop courts sont des temps de marche et d'arrêt en moyenne inférieurs à 10 minutes chacun (3 démarrages par heure).

Pour imposer des temps d'arrêt suffisants (indispensable pour que la haute pression chute avant un redémarrage), toutes les pompes à chaleur sont équipées d'une temporisation. L'idéal est que celle-ci soit réglable pour s'adapter à l'inertie de l'habitation (de 10 mn minimum à 30 mn). Quelle que soit l'hystérésis du thermostat, les cycles trop courts peuvent ainsi être évités. À l'inverse, une temporisation trop longue accroît les variations de température et génère de l'inconfort.





## Le régulateur loi d'eau

Si le climat est très continental avec des variations brusques, des chutes de température dans l'habitation peuvent présenter un inconfort accentué par la lenteur du rattrapage de la consigne. Dans ce cas, le simple thermostat d'ambiance peut ne pas convenir aux personnes les plus exigeantes.

Le contrôle du chauffage par sonde extérieure permet d'améliorer sensiblement la régulation grâce à son action d'anticipation. De plus une correction d'ambiance (facultative) permet de prendre en compte les apports énergétiques internes (feu dans la cheminée par exemple).

Le fonctionnement de la pompe à chaleur est piloté par un régulateur dit « loi d'eau » qui effectue une mesure de température extérieure, une mesure de température de retour d'eau d'un plancher chauffant ou de radiateurs et éventuellement une mesure de température ambiante.

Si la pompe à chaleur n'est pas surpuissante et si le volume d'eau de l'installation est suffisant (voir chapitre « Raccordement hydraulique de la pompe à chaleur »), le régulateur commande directement le fonctionnement du compresseur en mode tout ou rien. L'hystérésis est réglée vers 5 K. Pour affiner ce réglage, il faut mesurer le temps de décroissance de la température de retour du plancher chauffant. Le compromis se fait entre des temps d'arrêt suffisants du compresseur (> 20 mn par exemple) et l'absence de baisse de température significative dans la maison. L'économie d'un ballon tampon et d'une vanne trois voies motorisée est appréciable et la fiabilité meilleure. Certains régulateurs comportent uniquement une sortie tout ou rien pour la commande directe du compresseur. D'autres permettent la commande des moteurs de vannes 3 voies grâce à une sortie impulsionnelle. Ces derniers sont nettement plus chers.

## LE RÉGLAGE DE LA PENTE DU RÉGULATEUR DE CHAUFFAGE

On appelle « pente » la valeur de laquelle il faut augmenter la température de l'eau du chauffage lorsque la température extérieure diminue de 1 K.

Le réglage de la pente dépend de l'installation. Voici son calcul :

Température eau de retour = [(température ambiante – température extérieure) x pente] + température ambiante.

Soit : pente = (température eau de retour – température ambiante)/(température ambiante - température extérieure).

Exemple : dans une maison chauffée à 20 °C, la température d'eau de retour du plancher chauffant est de 25 °C lorsqu'il fait 10° C dehors. La pente est 0,5. Si la température extérieure chute de 10 K, la température d'eau du plancher chauffant devra augmenter de : 10 x 0,5 = 5 K. Les nouvelles températures sont :

Température extérieure : 10 – 10 = 0 °C

Température d'eau de retour du plancher chauffant : 25 + 5 = 30 °C

Température ambiante : régulée à 20 °C.

Pour un plancher chauffant, le réglage de pente se situe vers 0,5 et l'hystérésis vers 5 K.

Pour des radiateurs basse température, le réglage de pente se situe vers 1 mais dépend fortement de la surface d'échange des radiateurs. L'hystérésis est réglée vers 10 K.

Sur les installations comportant une vanne trois voies, la sonde de température d'eau se place immédiatement sur le départ d'eau et non sur le retour.





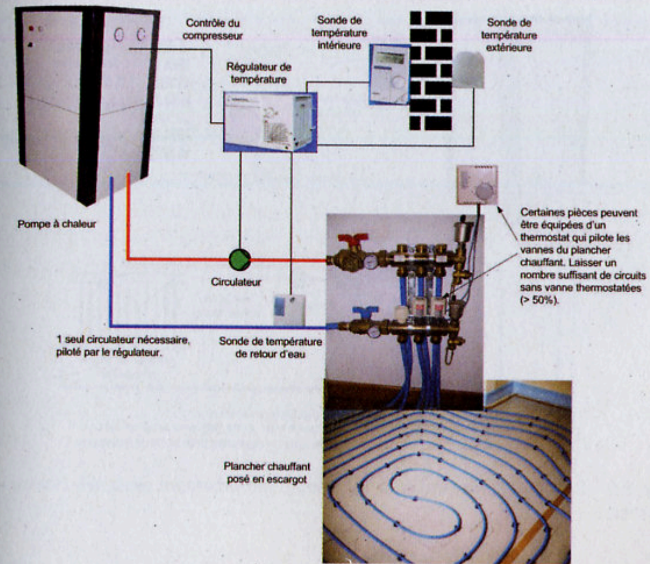



*Fig. 5.7 – Schéma d'une régulation loi d'eau pour plancher chauffant seul*

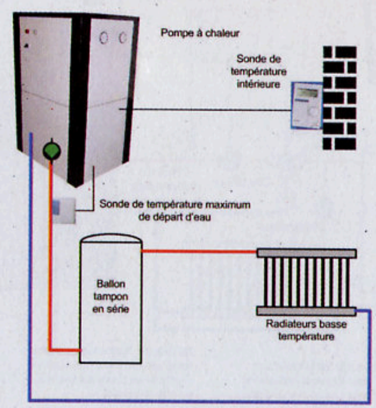



*Fig. 5.8 – Schéma d'une régulation loi d'eau pour radiateurs seuls sans vanne 3 voies*

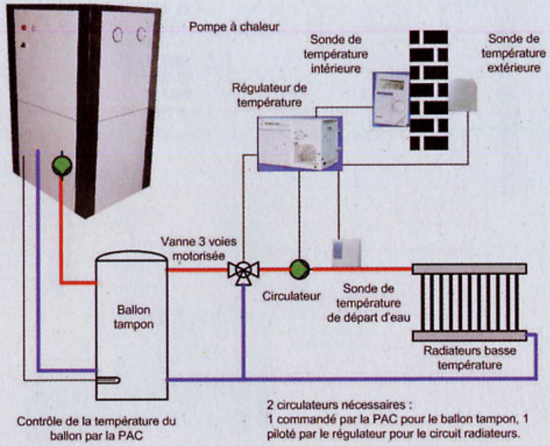



*Fig. 5.9 – Schéma d'une régulation loi d'eau pour radiateurs seuls avec vanne 3 voies*

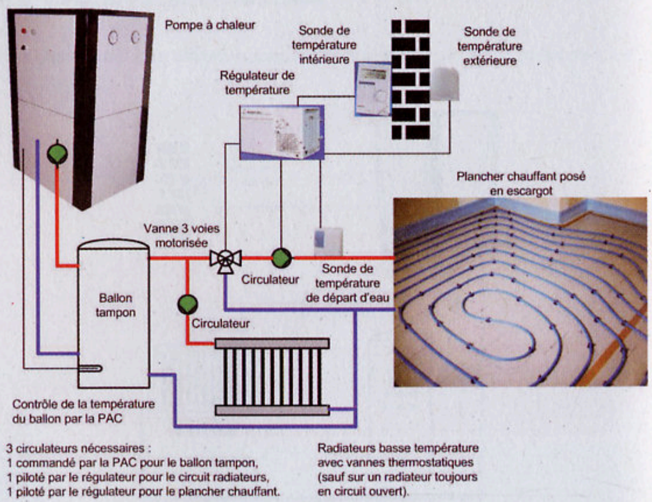



*Fig. 5.10 – Schéma d'une régulation loi d'eau pour plancher chauffant et radiateurs*





Il existe aussi des régulateurs de température d'eau de retour sans sonde extérieure. Dans ce cas, l'ajustement de la consigne de température d'eau de retour se fait manuellement. Le thermostat d'ambiance, câblé en série avec le régulateur, sert de limiteur de température.

Les pompes à chaleur sol/sol ne peuvent évidemment utiliser de régulateur sur l'eau. Généralement, la température du condenseur (la dalle) est contrôlée par le pressostat HP câblé en série avec le thermostat d'ambiance.

# 6 Comment bien choisir sa pompe à chaleur ?

Le choix de la source chaude est imposé par le mode de restitution des calories possible dans l'habitation. Air, eau pour radiateurs, eau pour plancher chauffant basse température.

La zone climatique H1, H2 ou H3 et la température de base orientent le choix de la source froide vers l'air, l'eau ou la terre. La

**PRESTATIONS À INCLURE DANS LE BUDGET**

**Le budget peut aussi imposer ou éliminer des solutions. Attention de bien inclure toutes les prestations nécessaires au poste chauffage dans son ensemble : par exemple, frais de terrassement pour un capteur horizontal, frais de forages pour une pompe à chaleur eau/eau.**

**Éviter les installations sol/sol aux prix très (trop !) attractifs qui ne chauffent, par exemple, que le rez-de-chaussée et proposent des radiateurs électriques à l'étage. À l'usage, la tendance naturelle consiste à rentabiliser au maximum la pompe à chaleur, en limitant l'usage des radiateurs électriques.**

**Trop souvent, la surface du capteur ne suffit pas à fournir l'énergie nécessaire à l'habitation pendant tout l'hiver, d'où des gonflements de terrain et des consommations excessives. Cette solution devient acceptable à condition d'ajouter un chauffage d'appoint économique (poêle à bois par exemple) qui permet de soulager le capteur pendant les périodes de grand froid.**





configuration du terrain, la présence d'eau souterraine ou non, permettent d'affiner le mode de prélèvement des calories (eau de puits, eau glycolée, fluide dans le terrain).

## ADAPTATION DE LA POMPE À CHALEUR À L'HABITATION

Certaines configurations sont optimales, d'autres sont à éviter.

Voici un tableau récapitulatif des différents types de pompes à chaleur (PAC) en fonction des paramètres de l'habitation, avec une classification par prix englobant toute l'installation (1 pour la solution la plus économique à 7 pour la plus chère) :

| Types de PAC | Air/air | Air/eau | Eau/eau | Eau glycolée/ eau | Sol/eau | Sol/sol |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T de base > – 5 °C | OUI | OUI | OUI | OUI | OUI | OUI |
| Climatisation | OUI | Sur ventilo-convecteurs | Sur ventilo-convecteurs | Sur ventilo-convecteurs | NON | NON |
| Rafraîchissement en PC | x | OUI | OUI en freecooling | OUI en freecooling | NON | NON |
| Radiateurs | x | Possible, COP moyen | OUI | OUI | OUI | NON |
| PC | x | OUI | OUI | OUI | OUI | OUI |
| Ventil-convecteurs | OUI | OUI à eau | OUI à eau | OUI à eau | OUI à eau | OUI en série avec le PC |
| | | | | | | |
| – 10 °C < T de base < – 5 °C | Possible en climat sec | Possible en climat sec | OUI | OUI | OUI | OUI |
| Climatisation | OUI | Sur ventilo-convecteurs | Sur ventilo-convecteurs | Sur ventilo-convecteurs | NON | NON |
| Rafraîchissement | x | OUI | OUI en freecooling | OUI en freecooling | NON | NON |
| Radiateurs | x | Déconseillé | OUI | OUI | OUI | NON |
| PC | x | OUI | OUI | OUI | OUI | OUI |
| Ventiloconvecteurs | OUI | OUI à eau, COP médiocre | OUI à eau | OUI à eau | OUI à eau | OUI en série avec le PC |
| | | | | | | |





| Types de PAC | Air/air | Air/eau | Eau/eau | Eau glycolée/ eau | Sol/eau | Sol/sol |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T de base < – 10 °C | Déconseillé | Déconseillé | OUI | OUI | OUI | OUI |
| Climatisation | x | x | Sur ventilo-convecteurs | Sur ventilo-convecteurs | NON | NON |
| Rafraîchissement | x | x | OUI en freecooling | OUI en freecooling | NON | NON |
| Radiateurs | x | x | OUI | OUI | OUI | NON |
| PC | x | x | OUI | OUI | OUI | OUI |
| Ventiloconvecteurs | x | x | OUI à eau | OUI à eau | OUI à eau | OUI en série avec le PC |
| Classement par coût | 1 | 2 | 6/7 avec puits de captage et puits de rejet | 5 en capteur plan<br>7 en forage profond | 4 | 3 |

# LE DIMENSIONNEMENT DE LA POMPE À CHALEUR

Le dimensionnement optimal de la pompe à chaleur est donc un facteur clé de la réussite d'une installation de chauffage. Une bonne étude thermique, sérieuse et précise (calcul détaillé de toutes les déperditions : parois, renouvellement d'air, ponts thermiques, etc.) doit être effectuée par un cabinet spécialisé indépendant. Le prix d'une telle étude reste faible devant l'investissement pour le chauffage d'une maison (environ 300 € HT en 2007). La puissance de la pompe à chaleur sera alors parfaitement adaptée à l'habitation. La surpuissance sera idéalement de 10 % (20 % grand maximum). Il peut être intéressant d'opter pour une machine sous-puissante et de prévoir un complément de type poêle par exemple. Dans ce cas, le puisage des calories (par capteurs plan principalement) doit être largement dimensionné pour l'éventualité où le poêle serait peu utilisé. Nous insistons particulièrement sur les problèmes liés à une surpuissance non maîtrisée puisque, paradoxalement, cela peut conduire à l'impossibilité de chauffer correctement l'habitation.

Prenons un exemple extrême pour mieux comprendre : une pompe à chaleur 2 fois trop puissante est raccordée à un plancher chauffant sous-dimensionné (pas de 30 cm, peu de boucles de trop grande longueur : > 90 m). Cette pompe à chaleur, du fait de sa grande puissance et du faible débit d'eau, fournira en sortie de l'eau à haute température.

Il est probable que l'eau en sortie de la machine atteindra 45 °C (valeur limite habituellement retenue en entrée de plancher chauffant) en moins de 10 minutes.

Avec une temporisation au démarrage de 15 minutes, cette pompe à chaleur ne fonctionnera que 40 % du temps alors qu'il aurait fallu 50 % puisqu'elle est 2 fois trop puissante. Il en résulte que ce chauffage sera au final 20 % sous-puissant. Pour chauffer correctement l'habitation, il faudra diminuer la temporisation au démarrage, mais cela conduira à des cycles de fonctionnement très courts.





**MISE EN GARDE CONCERNANT L'ISOLATION DE L'HABITATION**

**Attention aux désagréables surprises qui peuvent intervenir du fait d'une forte sous-estimation des déperditions de l'habitation, tel cet exemple vécu : l'isolation est confiée à des isolants minces réflectifs. Le calcul des déperditions se base sur une résistance thermique équivalente (parfois notée $R_T$) beaucoup trop optimiste. Il en résulte une puissance de chauffage calculée environ 40 % trop faible. La pompe à chaleur a été dimensionnée à partir d'une estimation des déperditions fausse : la température de confort dans la maison est difficile voire impossible à atteindre. La consommation électrique est trop élevée. Pour remédier à un tel problème, c'est l'isolation qu'il faudrait sensiblement améliorer et non pas augmenter la puissance de chauffage en choisissant une pompe à chaleur plus puissante ou en adoptant un chauffage d'appoint.**

# LA QUALITÉ DE LA POMPE À CHALEUR

Après avoir choisi un type de pompe à chaleur, tentons d'appréhender la qualité de conception et le soin apporté à la fabrication.

## Comment vérifier la pompe à chaleur ?

De même que vous avez la possibilité de visiter des pavillons témoins, d'essayer sur route votre future voiture, n'hésitez pas à demander aux installateurs que vous consulterez de visiter une installation de chauffage par pompe à chaleur en fonctionnement.

## AVOIR L'ŒIL CRITIQUE À L'ACHAT

**Nous conseillons à l'acheteur potentiel d'observer soigneusement sa future pompe à chaleur tous capots ouverts. Lors de salons et foires, nous recommandons de comparer les produits de plusieurs fabricants. Il est alors relativement aisé, même pour le néophyte, de suivre le parcours que fait le fluide frigorigène et de reconnaître les éléments principaux du circuit. Par comparaison entre plusieurs fabrications (avec photos éventuellement), le futur acquéreur saura faire la différence entre les machines bien équipées et celles dont le prix de revient a été trop tiré. Il en est de même pour le soin apporté à la réalisation (qualité des soudures, large cintrage des tubes par exemple).**

En fonctionnement établi, une pompe à chaleur bien réglée et bien chargée en fluide frigorigène n'aura plus de bulles visibles au voyant de liquide : c'est la preuve que tout le fluide a pu se condenser et donc que la puissance délivrée peut être maximum. Les oscillations (pompage) du détendeur thermostatique se visualisent souvent par des passages d'importants flots de bulles à intervalles réguliers (quelques minutes). Ce phénomène est bien visible grâce au voyant.

Il convient de fuir toute pompe à chaleur dont le voyant de liquide indique un taux d'humidité anormal dans le circuit. Selon les fabricants de voyants, la couleur jaune ou rouge indique un taux d'humidité anormal dans le circuit (WET) et la couleur verte ou bleu foncé indique un circuit suffisamment sec (DRY). Le déshydrateur étant monté à proximité du voyant, il supprime normalement d'autant mieux l'humidité à ce niveau. Ce n'est pas en fonctionnement que la situation peut s'améliorer, au contraire, le déshydrateur continuera à se saturer. La seule chose à faire est de le changer. Un soin rigoureux pendant l'assemblage de la pompe à chaleur et un tirage au vide prolongé permettent d'obtenir un circuit frigorifique sec et propre, gage de longévité et de performance. Certains fabricants poussent l'économie (quelques euros !) jusqu'à supprimer le voyant de liquide : de cette façon, le taux d'humidité dans le circuit





est incontrôlable. Cette omission est logique pour les réfrigérateurs ménagers, dont le circuit frigorifique ne recevra jamais aucune maintenance, mais certainement pas pour des pompes à chaleur, qui coûtent des milliers d'euros.




*Fig. 6.1 – Photo voyant jaune/vert avec des bulles*

Après quelques années de fonctionnement, une panne fréquente des pompes à chaleur que nous connaissons est la perte du fluide frigorigène par des microfuites. Le plus souvent, les valves qui servent à remplir, vider ou effectuer les réglages du circuit frigorifique, se mettent à fuir légèrement. Ces valves, appelées *schrader*, fonctionnent selon le même principe que celles des pneus de voitures. Leur réalisation est cependant plus robuste afin de résister à de fortes pressions (30 bars).

L'étanchéité est assurée par un joint derrière l'obus (partie centrale) et par un caoutchouc logé dans le bouchon de protection. Ces joints vieillissent d'autant plus vite qu'ils sont soumis à de fortes températures. Les valves montées à proximité de la sortie du compresseur sont exposées aux vapeurs surchauffées (70 °C ou plus) et assurent rarement une étanchéité satisfaisante plus de 5 ans. Pour pallier le problème d'une telle conception, il est possible de remplacer le bouchon à visser à la main et son joint en caoutchouc par un écrou borgne 6 pans et un joint en cuivre (en cas de démontage, le joint en cuivre sera systématiquement remplacé). Une bonne conception consiste simplement à monter la valve au bout d'un long tube fin (par exemple 6 mm de diamètre et 30 cm de long) qui dissipe la chaleur au fur et à mesure que l'on s'éloigne de sa soudure sur le tube de refoulement du compresseur.

Sur la pompe à chaleur que vous souhaitez acheter, vous pouvez vérifier, capots ouverts, où et comment sont placés ces piquages de pression avec leurs valves, ainsi que les bouchons utilisés (à visser à la main ou écrou 6 pans).

Vous pouvez aussi vous assurer de la présence des protections adéquates du compresseur, tant sur le circuit frigorifique que sur le circuit électrique : pressostats BP et HP (ce dernier réglable de préférence), temporisation anti court cycle (réglable de préférence), disjoncteur courbe D ou fusibles aM et relais thermique réglable obligatoirement.

Pour votre confort acoustique, veillez à ce que le bâti de la pompe à chaleur soit bien insonorisé, si possible avec des matériaux lourds, de façon à réduire les vibrations basses fréquences.

## Les certificats

Bon nombre de pompes à chaleur sont certifiées par l'organisme Promotelec. Elles répondent donc à un cahier des charges strict, ce qui assure le respect des règles de l'art essentielles de la part du fabricant.

L'organisme Eurovent effectue des mesures en laboratoire sur les pompes à chaleur. Ainsi vous pouvez comparer la performance réelle du matériel.





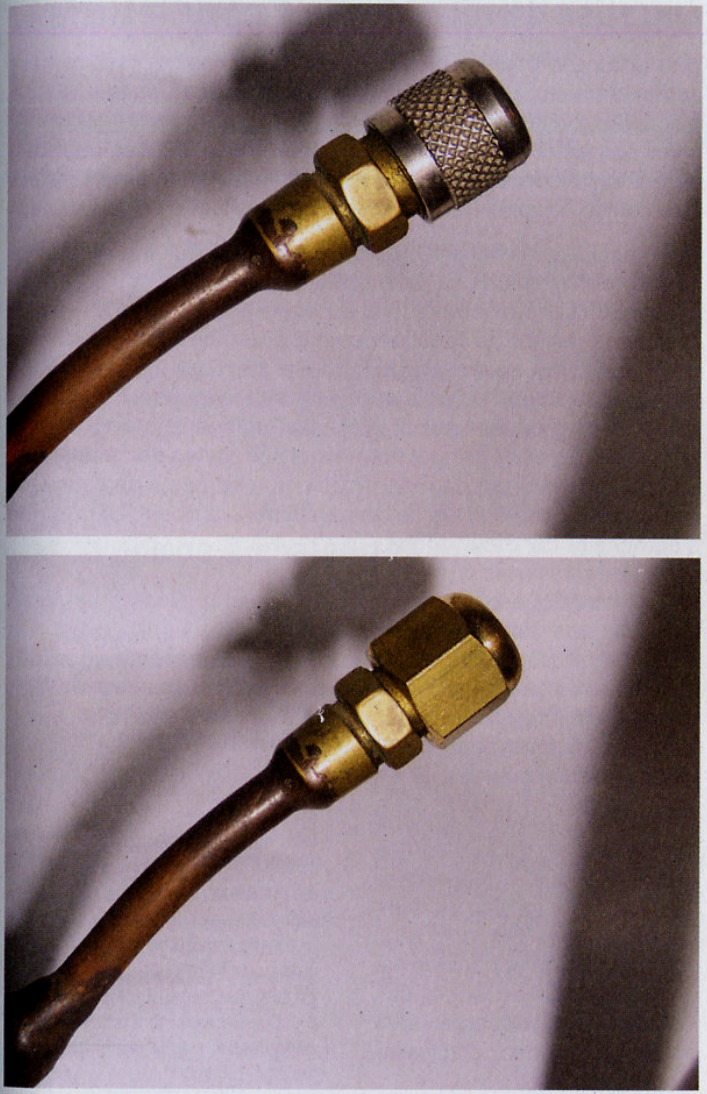


*Fig. 6.2 – Photo valve schrader*

## Entretien de votre pompe à chaleur

Une pompe à chaleur bien conçue ne nécessite pratiquement aucun entretien. Une visite des installations récentes tous les 3 à 5 ans pour contrôler les circuits d'eau (intérieur et extérieur) suffit et les compétences d'un bricoleur expérimenté ou d'un plombier chauffagiste conviennent. Les installations anciennes pourraient être contrôlées plus fréquemment, tous les 2 ans par exemple.

Les mesures pressions/températures sur le circuit frigorifique ne sont à vérifier qu'en cas de problème majeur : baisse significative de puissance, nombreuses bulles en permanence au voyant de liquide, arrêts de fonctionnement anormaux. Ces dernières opérations sont du ressort du frigoriste bien que la visualisation de bulles au voyant soit à la portée de tout le monde. Nous insistons donc à nouveau sur la présence indispensable du voyant de liquide, puisqu'il permet même aux néophytes de déceler une anomalie dans le circuit frigorifique d'une pompe à chaleur. Des interventions préventives deviennent ainsi possibles. Le contrôle d'étanchéité du circuit frigorifique s'effectue avec un détecteur électronique capable de détecter une fuite inférieure à 5 grammes/an. Un produit moussant en bombe aérosol peut compléter le détecteur électronique mais ne le remplace en aucun cas.

Certaines pompes à chaleur sont très bien instrumentées et fournissent tous leurs paramètres de fonctionnement (températures, HP, BP, etc.) sur le réseau téléphonique via un modem. Cela permet aux installateurs d'effectuer des contrôles et des diagnostiques à distance.

### Conseil

Il est possible que vous soyez influencé commercialement pour souscrire un contrat d'entretien pour votre pompe à chaleur. Selon la réglementation actuelle, seul le matériel qui contient plus de 2 kg de réfrigérant (HFC) est soumis à une visite annuelle pour vérifier l'étanchéité du circuit. Par conséquent, seules les installations sol/sol et sol/eau seraient concernées ainsi que certaines pompes à chaleur air/eau de forte puissance. En pratique, cette exigence n'est pas appliquée à notre connaissance actuellement chez les particuliers.





## Exemples d'installations fiables et performantes

Voici les types d'installations de chauffage et de production d'ECS par pompes à chaleur que nous apprécions pour leur simplicité, leurs performances, leur fiabilité et leur entretien minimum. Par exemple pour une habitation en zone H1 ou H2 :

- Une pompe à chaleur sol/eau assemblée en usine ou une pompe à chaleur eau glycolée/eau pouvant fonctionner en *free cooling* raccordée à un plancher chauffant pour toute l'habitation.
- Une production d'ECS indépendante avec compresseur à hautes performances (Scroll ou rotatif) qui ne fonctionne qu'en heures creuses (temps de chauffe < 6 heures).

## Comment vérifier la puissance délivrée par la pompe à chaleur et son COP

Pour les pompes à chaleur restituant les calories dans l'air, une évaluation de la puissance fournie dans l'habitation peut être réalisée par comparaison. L'opération consiste à remplacer temporairement le chauffage avec la pompe à chaleur par une autre source d'énergie facilement mesurable : des radiateurs électriques thermostatés conviennent parfaitement. Pour une précision acceptable, la mesure se fera préférentiellement sur une durée d'environ 24 heures avec des températures extérieures et intérieures les plus constantes possible (l'idéal est un temps couvert sans vent). Un compteur d'énergie électrique (Wattheuremètre) mesure tout d'abord la consommation de la pompe à chaleur sur 24 h (notée $E_{pac24h}$). Ensuite, le compteur est relié à l'ensemble des radiateurs électriques afin de mesurer leur consommation dans les mêmes conditions de température et sur 24 h également (notée $E_{radiat24h}$).

Le COP global apparaît immédiatement :
$COP = E_{radiat24h} / E_{pac24h}$.

La puissance thermique moyenne de la PAC est : $Pth_{moy}$ = (COP x $E_{pac24h}$)/ 24h. En mesurant également le temps de fonctionnement en heures (noté $T_{marche}$) de la pompe à chaleur (à l'aide d'un compteur horaire), il est possible d'obtenir la puissance thermique instantanée :

$Pth_{instant} = Pth_{moy} \times (24/ T_{marche})$.

Le temps de fonctionnement de la pompe à chaleur, en fonction de la température extérieure, permet d'évaluer aussi le dimensionnement de la machine par rapport aux besoins de l'habitation. Ces mesures fournissent naturellement les déperditions de la maison : Déperditions = $P_{moy}$/ dT en Watt/Kelvin (dT est la différence entre la température intérieure et la température extérieure pendant les mesures).

Comprenons que les opérations à effectuer ci-dessus sont lourdes à mettre en œuvre et nécessitent du matériel relativement onéreux : compteur d'énergie, compteur horaire, radiateurs électriques thermostatés, thermomètres mini/maxi intérieur/extérieur. Cette campagne de mesure devient quasiment irréalisable pour les grandes habitations avec de nombreuses pièces.

Pour les pompes à chaleur restituant les calories dans l'eau, des mesures de puissance sont réalisables un peu plus facilement : ce sont les mesures de débit et de température de l'eau qui indiquent la puissance délivrée par la machine. Pour les températures, un thermomètre à deux sondes convient très bien : l'une d'elles est fixée à l'aide d'un adhésif conducteur thermique (« scotch » aluminium ou cuivre par exemple) sur le départ d'eau chaude de la pompe à chaleur, l'autre sonde se place de la même manière sur le retour d'eau. Ainsi, par différence, on obtient le $dT_{eau}$ de la machine.

$dT_{eau}$ = température de sortie d'eau – température d'entrée d'eau.

Pour mesurer le débit d'eau en circulation, deux solutions sont possibles :





- placer un débitmètre en série dans le circuit du chauffage. Cette solution est efficace et fiable ; le débitmètre peut être laissé à demeure s'il ne rajoute pas une perte de charge exagérée (< 10 % de la perte de charge du circuit de chauffage). Prix approximatif d'un débitmètre à flotteur : 150 à 300 €.
- effectuer une mesure en boucle ouverte avec circulation d'eau courante dans la pompe à chaleur. Le débit est évalué en chronométrant le temps de remplissage d'un volume connu. Cette solution gaspille généralement une grande quantité d'eau et ne permet pas d'obtenir facilement plusieurs points de température $dT_{eau}$ (sortie – entrée) de la pompe à chaleur.

Nota : l'évaluation du débit d'eau dans le circuit de chauffage à partir des abaques « débit en fonction de la hauteur manométrique » du circulateur n'offre pas une précision suffisante.

Attention aux mélanges anti-corrosion et/ou antigel dans le circuit : leur viscosité fausse légèrement les mesures des débitmètres qui sont habituellement gradués pour de l'eau. Un coefficient correcteur donné par le fabricant ou par un étalonnage « maison » doit être appliqué.

La puissance fournie par la pompe à chaleur est :

$P_{fournie} = 1,16 \times \text{Débit} \times dT_{eau}$.

Où $P_{fournie}$ est exprimée en Watts, débit en litres/heure et $dT_{eau}$ en Kelvin.

Le COP se retrouve Après avoir mesuré la puissance électrique ($P_{élect}$) consommée par la pompe à chaleur avec un wattmètre (ou un wattheuremètre en divisant l'énergie consommée par le temps de fonctionnement). Prix approximatifs, d'un compteur d'énergie : 150 à 250 € ; d'un compteur horaire : 20 à 30 €.

$COP = P_{fournie} / P_{élect}$

Il est intéressant de mesurer le COP pour différentes températures d'eau chaude et d'air extérieur pour les pompes à chaleur air/eau.

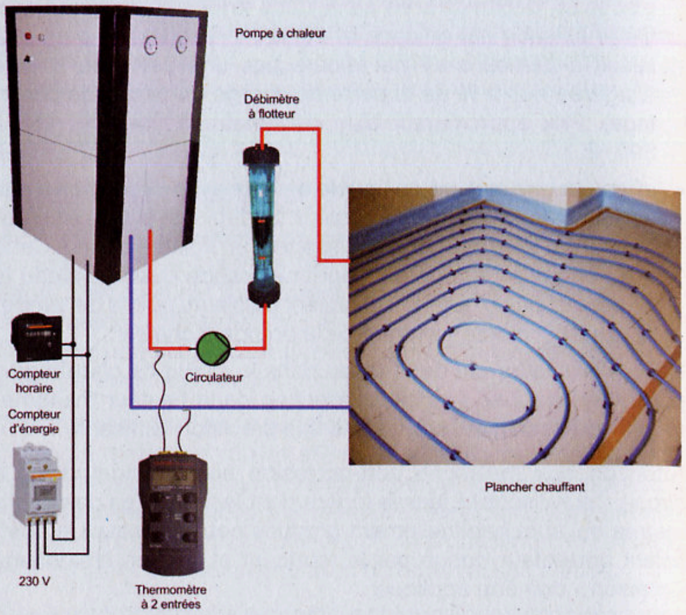



*Figure 6.3 – Schéma pour effectuer des mesures de puissance, de consommation et de COP sur une pompe à chaleur restituant les calories dans l'eau*

# QUELLE ÉCONOMIE VOUS APPORTERA VOTRE CHAUFFAGE PAR POMPE À CHALEUR ?

Le COP intrinsèque des pompes à chaleur, souvent présenté commercialement comme facteur essentiel dans l'économie réalisée ne doit pas cacher la vision globale de votre futur système de chauffage.





## Consommation des éléments auxiliaires

Quelle est la consommation des éléments auxiliaires (circulateurs, ventilateurs, résistances additionnelles, etc.) ? Par exemple, un circulateur pour capteur à eau glycolée consomme environ 200 W, celui du plancher chauffant environ 100 W, pour un compresseur qui consomme 3 000 W. Nous constatons que le COP global est déjà de 10 % inférieur à celui que pourrait atteindre le compresseur. Si votre installation se complexifie avec l'ECS intégrée et des radiateurs en plus du plancher chauffant, ce sont deux circulateurs supplémentaires qu'il faudra alimenter ! Dans une démarche de chasse au gaspillage d'énergie, il est souhaitable de remplacer les circulateurs anciens dont le rendement est déplorable (moteur asynchrone monophasé avec rotor noyé) par des circulateurs modernes à haut rendement grâce à leur moteur à aimants permanents piloté électroniquement. Une économie de 60 % est ainsi réalisable sur ce poste ! Le fabricant Grundfos, par exemple, propose actuellement ce type de circulateurs. Pour les pompes à chaleur à air, la ventilation de l'évaporateur consomme environ 10 % de la puissance électrique du compresseur. Le dégivrage dans de mauvaises conditions climatiques grève, lui aussi, la performance de 10 à 15 % supplémentaires.

Comparez aussi le prix des abonnements EDF (monophasé ou triphasé) pour inclure ce paramètre dans votre budget prévisionnel.

Voici les économies moyennes qu'il est possible de réaliser en fonction des différentes configurations et des types de pompes à chaleur, comparativement à un chauffage électrique par effet joule (COP = 1) :

| Types de PAC | Air/air | Air/ eau | Eau/ eau | Eau glycolée/ eau | Sol/ eau | Sol/sol |
|---|---|---|---|---|---|---|
| COP sur radiateurs | x | 2 | 3,5 à 4 | 3 | 3 | x |
| | | | | | | |
| COP sur PC | x | 2,5 à 3 | 5 à 5,5 | 3,5 à 4,5 | 3,5 à 4 | 4 |
| | | | | | | |
| COP sur ventilo-convecteurs | 2.5 à 3 | 2,5 | 4 | 3,5 | 3,5 | x |

Ces valeurs doivent être considérées relativement les unes par rapport aux autres et non dans l'absolu, puisque chaque cas d'installation est unique. Pour les installations comportant un plancher chauffant et des radiateurs, c'est le COP sur radiateurs qu'il faut retenir, sauf cas assez rare où les radiateurs sont montés en série avec le plancher chauffant.

## Coût de consommation

Voici le coût de consommation et les frais annexes d'un chauffage par une pompe à chaleur comparés aux autres sources d'énergies :

Habitation nécessitant 10 000 kWh annuel pour le chauffage.

COP moyen d'une pompe à chaleur : 3,5.

**Tarifs du premier trimestre 2007**

| Énergie | Électricité | PAC | Bois en bûches dans un poêle | Bois en granulés | Gaz naturel | Gaz propane | Fioul domestique |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Prix TTC en euros | 934 | 267 | 530 | 480 | 460 | 1 025 | 650 |
| Abonnement en euros/an | + 210 (12 kVA double tarif) | + 127 (9 kVA double tarif) | 0 | 0 | 125 | 240 | 0 |
| Entretien en euros/an | 0 | 0 | 50 (ramonage) | 50 (ramonage) | 100 à 170 | 100 à 170 | 150 à 200 |

Le prix des abonnements électriques est calculé en surcoût par rapport à un abonnement de base 6 kVA simple tarif. Le prix du kWh est calculé pour une consommation régulière sur 24 heures sans privilégier les heures creuses (16 heures pleines, 8 heures creuses). Ces valeurs concernent le tarif régulé chez EdF.

Les rendements pris en compte sont ceux que l'on obtient avec des appareils de chauffage modernes et performants.

Les systèmes de dalle chauffante électrique à accumulation ne sont pas considérés puisqu'il est possible de faire fonctionner de manière identique une pompe à chaleur restituant les calories dans un plancher chauffant à accumulation (dalle de forte épaisseur) : un thermostat d'ambiance programmable augmente la température de consigne pendant les heures creuses afin de forcer le fonctionnement de la pompe à chaleur, puis l'abaisse en heures pleines pour profiter de l'énergie stockée dans la dalle. Attention, les trop grandes variations de température du sol nuisent au confort quel que soit le type de chauffage.

Le prix du bois en bûche peut varier de 50 % d'une région à l'autre (prix retenu : 53 €/stère).

Le prix des granulés de bois pour chaudière tend à augmenter (prix retenu : 200 €/tonne en vrac livré).

Le prix du gaz de ville (naturel) varie dans une moindre mesure selon les zones géographiques (prix retenu : 0,0431 €/kWh).

Le prix du gaz propane varie aussi considérablement selon les fournisseurs (prix retenu : 1,37 €/kg).

Le prix du fioul évolue rapidement et varie selon les quantités commandées (prix retenu : 0,59 €/litre).

## Aérothermie ou géosolaire ? Les performances en fonction du climat

Selon la température extérieure moyenne tout au long de l'hiver, il peut être judicieux d'opter pour une pompe à chaleur puisant les





calories dans l'air plutôt que dans la terre. Voyons dans quelles conditions.

Comparons le COP de différents types de pompes à chaleur (aérothermiques, géosolaires et sur eau) en fonction du climat où se trouve l'installation. Nous prenons pour cet exemple des machines « normalement » performantes dans leur catégorie et restituant la chaleur dans un plancher chauffant basse température. Toutes les consommations sont évidemment prises en compte (ventilateurs, pompes, circulateurs, etc.)

Nous constatons sur le graphique ci-dessous qu'une pompe à chaleur aérothermique présente un COP (courbe rose) équivalent à celui d'une pompe à chaleur géosolaire à capteur plan (courbe verte) pour une température extérieure d'environ 7 °C : point C (COP de 3,8). Pour une pompe à chaleur sur forage profond (COP de 4,2) le point d'intersection se trouverait vers 10 °C (point non noté sur le graphique).

Donc, en connaissant la température extérieure moyenne sur la période de chauffage il est possible de choisir judicieusement le type de pompe à chaleur qui apportera la meilleure économie. Attention aussi à l'investissement de départ.

Les DJU (degrés jours unifiés) permettent de connaître la rigueur du climat en un endroit donné. Ils sont calculés sur 232 jours par an ce qui correspondant à la période de chauffage conventionnelle du 1er octobre au 20 mai. Chacun de ces 232 jours, la température moyenne du lieu ($T_{moy}$) est comparée à 18°C (température au dessus de laquelle le chauffage devient inutile).

La formule qui en découle est :

$DJU = \Sigma_{1\,\text{à}\,232}(18 - T_{moy})$. Prenons un exemple. La station météo locale enregistre la température moyenne suivante : le 1er jour 16 °C, le 2e jour 17 °C, …, le 100e jour −2 °C, …, le 232e jour 12 °C. Le calcul se fait de la manière suivante : $DJU = (18-16) + (18-17) + \ldots + (18-(-2)) + \ldots + (18-12) = 2 + 1 + \ldots + 20 + 6$.

En connaissant le DJU d'un lieu, il est donc possible de déduire sa température moyenne sur 232 jours.

Exemple : le DJU à Toulouse est de 1 843. La température moyenne sur 232 jours égale 18 – (1 843/232) = 10 °C.

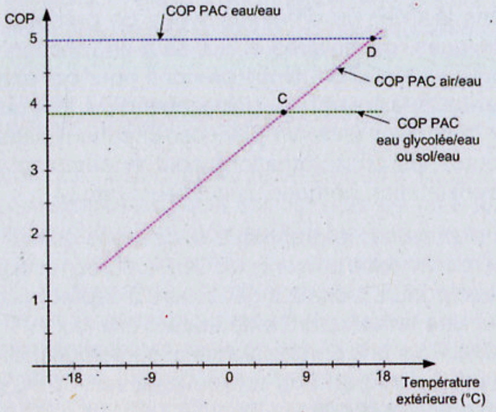



*Figure 6.4 – Comparaison de l'évolution du COP en fonction de la température extérieure pour différents types de pompes à chaleur.*

## CHOISIR ENTRE AÉROTHERMIE ET GÉOSOLAIREÉ

**Grâce aux DJU et au graphique ci-dessus, le choix entre une pompe à chaleur aérothermique ou géosolaire devient assez simple : pour une température moyenne supérieure à 7 °C, c'est-à-dire un DJU inférieur à 2 550 environ ((18 – 7) x 232), une pompe à chaleur puisant les calories dans l'air sera plus économique qu'une pompe à chaleur puisant les calories dans la terre avec un capteur plan.**
**Sur forage profond, le DJU devra être inférieur à 1 860 environ pour conserver l'avantage de l'aérothermie.**
**Les pompes à chaleur sur eau de nappe phréatique sont toujours plus économiques que les machines aérothermiques (le point d'intersection D correspond à une température extérieure voisine de 17 °C). Attention tout de même à la consommation de la pompe de relevage : cette dernière peut abaisser fortement le COP si elle est surdimensionnée ou si l'eau se trouve à grande profondeur.**
**Dans l'exemple pour la ville de Toulouse, l'aérothermie sera aussi économique que le puisage des calories sur forage profond et légèrement plus économique que le puisage sur capteur plan.**
**Ces calculs et le graphique ci-dessous ne sont qu'un guide général pour faciliter le choix d'une pompe à chaleur bien adaptée au climat du lieu d'installation (hors cas extrêmes : altitude élevée proche de la mer par exemple). D'autres éléments seront pris en compte tels que l'hygrométrie, les vents dominants et les microclimats locaux.**





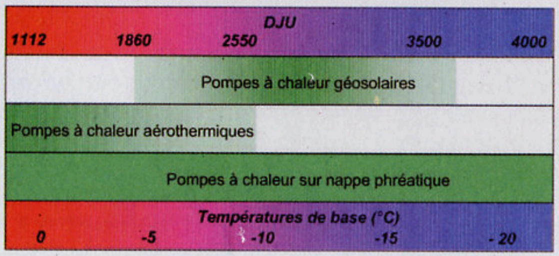



*Figure 6.5 – Plages de fonctionnement optimales des différents types de pompes à chaleur en fonction des DJU et des températures de base*

La liste des DJU pour les différentes stations climatiques de France se trouve en annexe, ainsi que les températures de base par département sur une carte de France.

Retenons qu'en dessous de –10 °C de température de base, l'aérothermie est fortement déconseillée, surtout si le climat est humide. Il faut aussi tenir compte de l'altitude. Pour cela, se reporter aux figures suivantes :

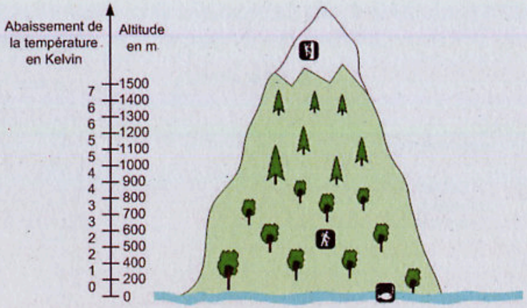



*Figure 6.6 – Variation de la température en fonction de l'altitude, valable pour des températures de base de – 2 °C à – 5 °C*

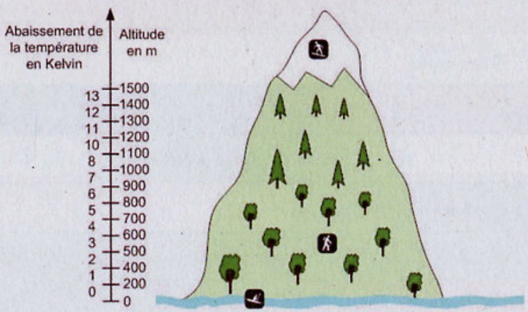



*Figure 6.7 – Variation de la température en fonction de l'altitude, valable pour des températures de base de – 6 °C à – 15 °C*

**COMMENT UTILISER CES GRAPHIQUES ?**

**Choisir tout d'abord sur la carte de France un département avec sa température de base associée (cette température correspond à une altitude 0). En fonction de la température de base du département choisi, se reporter sur l'un ou l'autre des graphiques. Lire sur l'axe vertical l'abaissement de la température de base pour l'altitude exacte du lieu.**





**Exemple 1 : nous cherchons la température de base à Saint-Anthème, département 63. La température de base (à altitude 0) est de – 8 °C sur ce département. Saint-Anthème se trouve à 950 m d'altitude environ. En se reportant à la figure 6.7, l'abaissement de la température est de 7 K. La température de base à Saint-Anthème est donc : – 8 – 7 = – 15 °C. L'aérothermie est très déconseillée.**
**Exemple 2 : nous cherchons la température de base à Isola, département 06. La température de base (à altitude 0) est de – 5 °C sur ce département. Isola se trouve à 870 m d'altitude environ. En se reportant à la figure 6.6, l'abaissement de la température est de 4 K. La température de base à Isola est donc : – 5 – 4 = – 9 °C. L'aérothermie est possible sachant que le climat est plutôt sec.**

Attention, ne pas confondre la température de base d'un lieu qui correspond à la température minimale atteinte quelques fois par hiver et la température moyenne ($T_{moy}$), exprimée ci-dessus, qui représente une moyenne sur de longues périodes calculée à partir des DJU.

PARTIE 3

# CHAUFFAGE ET EAU CHAUDE SANITAIRE

# L'EAU CHAUDE SANITAIRE (ECS) PAR POMPE À CHALEUR

Une pompe à chaleur permet aussi de produire de l'eau chaude sanitaire économiquement.

## Production d'ECS indépendante du chauffage

Côté source chaude, c'est bien sûr l'eau qui récupère les calories. Le condenseur est constitué soit d'un échangeur à plaques inox dans lequel circule en boucle l'eau du serpentin d'un ballon avec échangeur noyé, soit d'un tube enroulé tout autour de la cuve du ballon, créant ainsi une sorte de gaine chauffante. Dans ce dernier cas, l'échange reste moyen et le problème de corrosion entre le tube et la cuve est à considérer. Il est possible de réaliser des serpentins double enveloppe noyés dans le ballon avec un tube en cuivre emmanché dans un tube en titane par exemple. Notons que l'inox et le titane présentent une excellente garantie contre la corrosion. Le fluide frigorigène est toujours isolé de l'ECS par au moins deux parois, pour des raisons de sécurité sanitaire. C'est l'huile véhiculée par le réfrigérant qui poserait problème en cas de fuite (pollution du circuit d'eau potable). La contrainte de « double paroi » constitue un lourd handicap pour le fonctionnement des pompes à chaleur pour eau chaude sanitaire : l'écart de température entre le réfrigérant et l'eau du ballon est important, ce qui conduit à une température de condensation souvent aux limites admises par les fabricants de compresseurs. Côté source froide, les calories peuvent être prélevées dans l'air, dans l'eau, ou dans la terre. Il faut veiller à fonctionner avec une température d'évaporation la plus élevée possible pour obtenir un COP convenable, même en fin de cycle de chauffe de l'eau : la condensation atteint alors 60 à 65 °C.

L'évaporateur peut donc être constitué d'une ou deux couronnes de cuivre gainé enterrées. Un circuit d'eau glycolée extérieur





avec un échangeur supplémentaire nous paraît irrationnel pour une production d'eau chaude, vu l'investissement pour ce type de matériel.

Autre solution : un évaporateur à air ventilé peut extraire économiquement les calories d'un local tel qu'un vide sanitaire, une grande buanderie ou un garage (volume souhaitable : 50 m$^3$ ou plus). La puissance moyenne soutirée (environ 400 W moyen sur 24 heures pour 300 litres) n'abaisse guère la température du lieu. Les calories peuvent aussi astucieusement être récupérées sur la sortie de la VMC (ventilation mécanique contrôlée) de l'habitation. Si le chauffe-eau est directement raccordé à la sortie de la VMC, sa puissance thermique sera faible afin de ne pas imposer à l'habitation un débit de renouvellement d'air trop important. Par exemple, 400 m$^3$/h pour une puissance frigorifique prélevée de 1 200 W avec une puissance électrique du compresseur de 500 W et donc une puissance thermique délivrée de 1 700 W (COP de 3,4). Cette puissance est insuffisante pour qu'un tel chauffe-eau puisse fonctionner uniquement en heures creuses.

Nous préférons que le rejet de la VMC serve à tempérer un volume tampon non habitable dans lequel une puissante pompe à chaleur pour l'ECS puise ses calories. Par exemple, un évaporateur « brassant » 1 000 m$^3$/h prélève 2 200 W frigorifiques avec une puissance électrique du compresseur d'environ 900 W et donc une puissance thermique délivrée de 3 100 W. Avec une telle puissance, le chauffe-eau ne fonctionne qu'en heures creuses et sa rapidité de montée en température apporte un confort supplémentaire. Enfin, en présence d'eau de source ou de nappe, un échangeur à eau apporte une excellente source froide.

La puissance thermique du compresseur sera choisie de manière à pouvoir chauffer tout le volume du ballon en six heures, afin de faire fonctionner la pompe à chaleur exclusivement pendant les heures creuses (pour chauffer 300 litres, la puissance thermique doit être égale à 2600 W). Le coefficient de performance moyen se situe entre 2,5 et 4 ; environ 2,5 si la source froide provoque l'évaporation vers 0 °C (cas du capteur enterré) et avec un compresseur peu performant (petit compresseur à piston) ;

environ 4 si la température d'évaporation atteint 10 °C (cas d'un évaporateur sur de l'eau de source ou d'un évaporateur à air dans une ambiance aux environs de 15 °C) et avec un compresseur meilleur (compresseur rotatif ou Scroll).

### Quel chauffe-eau choisir ?

Éliminons de nos choix les chauffe-eau avec un COP proche de 2,5 qui fonctionnent sur 24 heures : le prix moyen du kWh sur 24 heures avec un contrat jour/nuit est 1,5 fois plus élevé que le tarif de nuit. L'économie réalisée par rapport à un ballon chauffé électriquement en heures creuses n'est que de 40 %.

En ne chauffant l'eau qu'en tarif de nuit, le bilan énergétique annuel pour l'ECS permet 60 à 70 % d'économies. Cette valeur est supérieure à l'économie réalisée par de l'ECS solaire dans la majorité des régions de France (cas où une résistance électrique chauffe l'ECS les jours sans soleil).

### *Avantage*

- Installation simple, efficace et indépendante du chauffage quelle que soit la saison.
- Avec le fluide frigorigène R134a, il est possible d'élever la température d'eau jusqu'à 65 °C. Dans ce cas, une résistance électrique de complément devient inutile. Le R134a est intéressant pour l'ECS tandis que pour le chauffage à basse température d'autres fluides conviennent mieux (R407C, R410A, R290).

### *Inconvénient*

- Il faut disposer d'une source froide adéquate (air de la VMC, air tempéré d'une pièce d'au moins 50 m³ ou 30 m² environ de surface de terrain).





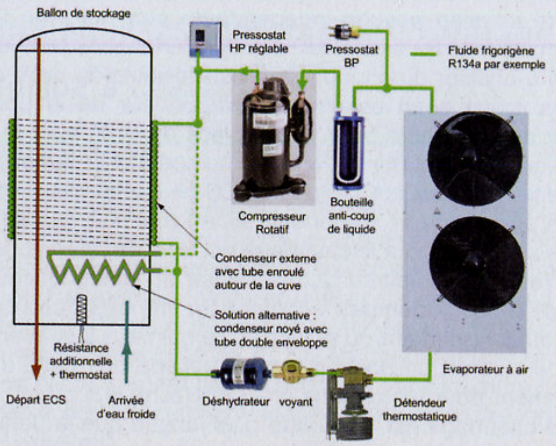



*Figure 6.8 – Synoptique d'une pompe à chaleur dédiée à l'ECS puisant les calories dans l'air. Deux types de condenseurs sont envisagés sur ce schéma : le tube enroulé autour de la cuve ; le serpentin double enveloppe noyé dans la cuve.*

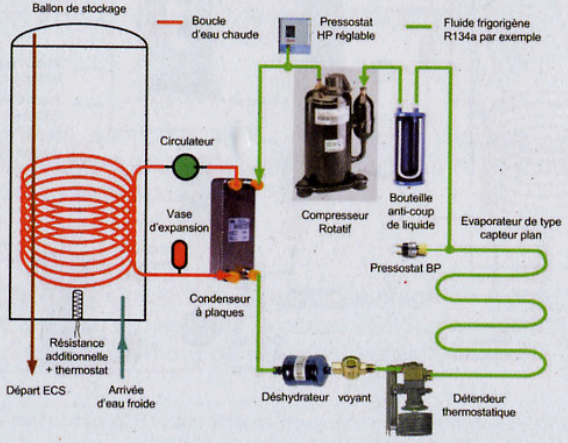



*Figure 6.9 – Synoptique d'une pompe à chaleur dédiée à l'ECS puisant les calories dans la terre avec un capteur plan à fluide frigorigène enterré. Le condenseur est un échangeur à plaques qui transf re les calories vers un serpentin noyé traditionnel de grande surface.*

Dernière solution pseudo-indépendante pour faire de l'ECS : placer une pompe à chaleur pour l'ECS en cascade avec la pompe à chaleur du chauffage. Il est possible de prélever des calories grâce à un échangeur (évaporateur de la pompe à chaleur indépendante pour l'ECS) placé en série avec le retour d'un plancher chauffant à eau. La température de l'eau étant relativement élevée, le COP pour l'ECS peut atteindre théoriquement 5 au maximum. Cependant si, en pratique, le COP de la pompe à chaleur pour le chauffage est de 4, le COP global pour l'ECS restera médiocreé (2,5) à cause du fonctionnement en cascade de deux pompes à chaleur. En été, l'ECS provoque un léger rafraîchissement du plancher, ce qui peut être intéressant avec de surcroît un bon COP. Nous retiendrons cette solution uniquement pour les régions chaudes (zone H3) où la période de non chauffage est beaucoup plus longue que la période de chauffage.

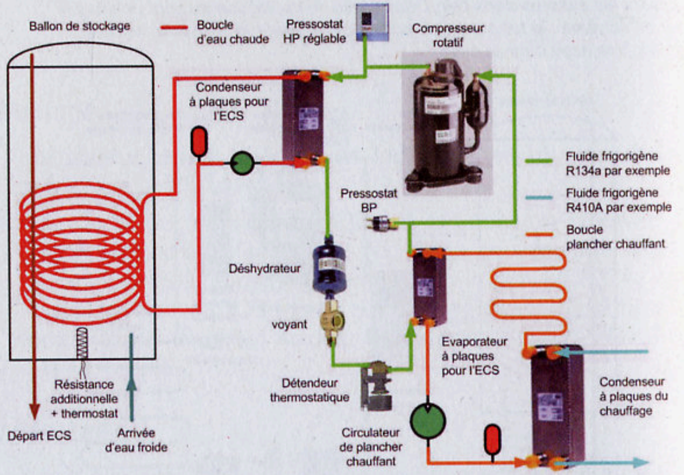



*Figure 6.10 – Synoptique d'une pompe à chaleur pour l'ECS puisant les calories sur le retour d'un plancher chauffant basse température.*





# Production d'ECS intégrée au chauffage par pompe à chaleur

## *En hiver uniquement*

Il est aussi possible d'obtenir de l'ECS grâce aux gaz surchauffés en sortie du compresseur d'une pompe à chaleur destinée au chauffage. Un petit échangeur « désurchauffeur » (réfrigérant/boucle du ballon ECS), placé en amont du condenseur, récupère environ 15 % de la puissance totale de la pompe à chaleur à haute température (plus de 70 °C). La condensation ne se fait pas dans ce petit échangeur additionnel mais toujours dans le condenseur destiné au chauffage, ce qui permet de conserver un COP excellent.

Le ballon à eau chaude atteint une température d'eau de 60 à 70 °C en hiver, et 30 à 50 °C en demi-saison. L'ECS ne peut être produite que pendant les temps de fonctionnement du chauffage. Un autre moyen est nécessaire pour obtenir de l'eau chaude sanitaire à 55 °C minimum tout au long de l'année.

### Avantage

- Simplicité, économie et eau très chaude disponible (65 °C) sans dégrader le COP et sans nécessiter un fluide frigorigène pour hautes températures (R134a).

### Inconvénient

- En période estivale ou lorsque le chauffage fonctionne peu, il faut un autre moyen pour produire l'ECS. Un capteur solaire prendrait dans ce cas parfaitement le relais.

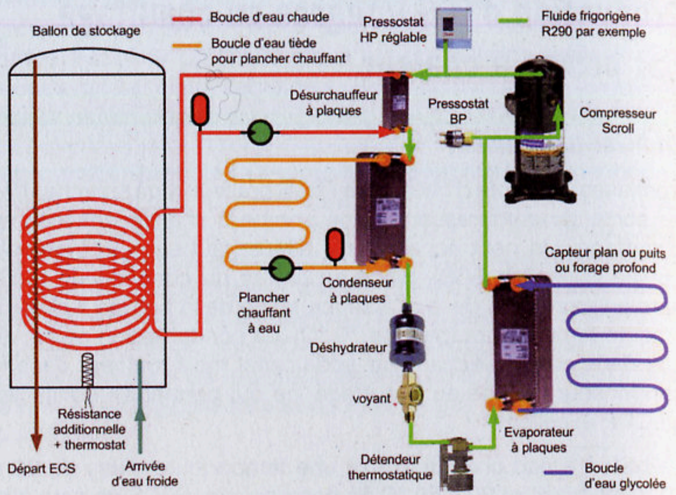



*Figure 6.11 – Synoptique d'une pompe à chaleur eau glycolée/eau pour le chauffage sur plancher chauffant et l'ECS pendant la période hivernale. L'échangeur « désurchauffeur » transfère les calories vers un serpentin noyé traditionnel de grande surface. La relève par capteurs solaires n'est pas représentée sur la figure.*

## Tout au long de l'année

Pour une production d'ECS tout au long de l'année, certaines pompes à chaleur chauffent de l'eau à deux températures différentes :

Par exemple, 35 °C pour le plancher chauffant et 50 à 55 °C pour produire l'ECS (une résistance électrique permet d'atteindre 65 °C pour détruire les bactéries).

Un automatisme contrôle la température de fonctionnement de la pompe à chaleur, donnant logiquement la priorité à la production d'eau chaude sanitaire sur le chauffage. Le COP de la pompe à chaleur est abaissé lors de la production d'ECS du fait de la température de condensation élevée. Généralement, le condenseur est utilisé pour le chauffage et pour l'ECS. Il est donc parfaitement dimensionné pour accepter toute la puissance de la pompe à chaleur dans tous les cas. Le problème se reporte sur l'échange entre le circuit d'eau dans la pompe à chaleur et l'eau sanitaire du ballon d'ECS. Le serpentin, noyé dans le ballon à eau chaude, doit présenter une surface d'échange très grande, de manière à minimiser l'écart de température et à accepter toute la puissance de la machine prévue pour du chauffage.





### Avantage

- La montée en température de l'eau est très rapide. Fonctionnement tout au long de l'année.
- Grâce aux pompes à chaleur hautes températures équipées des compresseurs à injection de vapeur (EVI), il est possible de produire de l'eau chaude sanitaire à 60 °C même en utilisant un fluide frigorigène tel que le R407C.

### Inconvénients

- La présence de deux échangeurs en cascade (un entre le réfrigérant et l'eau de la pompe à chaleur, plus un entre l'eau de la pompe à chaleur et l'eau chaude sanitaire) et la forte puissance à échanger augmentent les écarts de température et donc abaissent le COP (environ 3).
- Installation complexe.

Les pompes à chaleur destinées au chauffage à basse température utilisent généralement les réfrigérants suivants : R407C, R290 ou R410A. Le fluide frigorigène adapté aux hautes températures pour l'ECS (R134a) n'apporte pas des performances optimales pour le chauffage basse température.

Une résistance électrique est nécessaire pour atteindre 60 °C avec la plupart des pompes à chaleur classiques.

Les enjeux économiques pour la production d'ECS sont plus faibles que pour le chauffage mais plus généralisables à toutes sortes d'habitations. Le retour sur investissement devra donc être étudié de près.

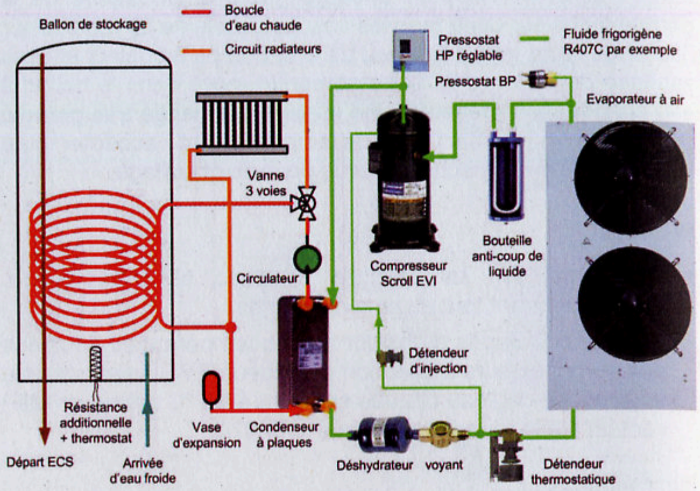



*Figure 6.12 – Synoptique d'une pompe à chaleur air/eau haute température (technologie EVI) pour le chauffage sur radiateurs et l'ECS tout au long de l'année. Le condenseur transf re les calories soit vers le circuit radiateurs, soit vers un serpentin noyé traditionnel de grande surface. Le ballon tampon en série avec les radiateurs n'est pas représenté sur cette figure.*

# L'IMPACT DU CHAUFFAGE PAR POMPE À CHALEUR SUR LE CONTRAT D'ABONNEMENT ÉLECTRIQUE

Le choix de la pompe à chaleur impacte fortement le type de contrat d'abonnement souscrit. Il importe donc de veiller autant à la technologie de pompe à chaleur choisie qu'aux conséquences de ce choix sur le coût de l'abonnement nécessaire et sur celui de l'installation électrique de l'habitation.

Le COP des pompes à chaleur se situant entre 3 et 4, la puissance souscrite est généralement égale à la moitié de celle





nécessaire pour une habitation équivalente chauffée par effet Joule (chauffage électrique).

## Installations de petite et moyenne puissance

Pour des installations de petite et moyenne puissance (< 12 kW), les compresseurs de pompes à chaleur fonctionnent en 230 V monophasé. L'intensité consommée atteint 15 A. Le contrat souscrit sera de 6 kW (30 A) au minimum (avec du délestage) à 9 kW (45 A). La tarification jour/nuit est choisie dans tous les cas.

Les solutions avec deux compresseurs montés en tandem permettent d'atteindre des puissances de 20 kW pour un courant consommé compris entre 20 et 25 A. Pour limiter la pointe de courant au démarrage, les deux compresseurs sont commandés avec un court décalage.

Les contrats 6 et 9 kW monophasés jour/nuit sont économiques et simples à gérer.

## Installations de grosse puissance

Pour les grosses puissances installées (> 14 kW), l'alimentation triphasée devient indispensable aux pompes à chaleur monocompresseur. Le contrat souscrit est alors de type triphasé entraînant d'importants surcoûts sur l'installation électrique de l'habitation.

Par exemple, pour une pompe à chaleur délivrant 15 kW thermique, le courant consommé sur chaque phase est de 8 A. Les appareils électroménagers alimentés en monophasé consomment couramment 12 à 15 A. Le casse-tête consiste alors à équilibrer les courants sur chaque phase !

Le contrat choisi devra délivrer au strict minimum 25 A par phase soit un abonnement 15 kW. Cette même installation équipée

d'une pompe à chaleur monophasée tandem n'aurait nécessité qu'un abonnement 9 kW !

À l'heure actuelle, il est possible de choisir les contrats *Tempo*, proposés par EdF dont l'abonnement est économique jusqu'à 18 kW. Hélas, le prix du kWh est variable tout au long de l'année (6 tarifs différents au total) et un gestionnaire d'énergie correctement programmé est indispensable.

Voici les principales caractéristiques des moteurs asynchrones monophasé, asynchrones triphasés et synchrones autopilotés utilisés dans les compresseurs hermétiques :

| Critères/Types de moteur | Moteur monophasé | Moteur triphasé | Moteur synchrone |
|---|---|---|---|
| Couple au démarrage | Moyen (nécessite un condensateur) | Fort | Fort |
| Rendement | Assez bon | Bon | Très bon |
| Variation de vitesse | Non adaptée | Adaptée | Optimale |
| Longévité/fiabilité | Très bonne (hors condensateurs) | Très bonne | Moyenne à bonne (liée à l'électronique de pilotage) |

En pratique, le couple nécessaire au démarrage des compresseurs Scroll, n'est pas très important. La différence de rendement théorique des moteurs se retrouve, en final, très atténuée sur le COP de la machine et dépend des modèles (+ 2 % à + 7 % environ en faveur des compresseurs triphasés à volume balayé identique).

Notons aussi que les moteurs asynchrones monophasés sont à présent bien optimisés, avec des dispositifs de démarrage performants : condensateur de marche permanent, condensateur de démarrage contrôlé par CTP (composant électronique statique qui ouvre un circuit électrique pour un seuil de température donné) qui assure un fort couple de démarrage. Les condensateurs de marche et les dispositifs de démarrage ont généralement une durée de vie inférieure à celle des moteurs.





Le seul avantage notoire du moteur à asynchrone triphasé reste la possibilité de faire varier sa vitesse (AC inverter).

## LES COÛTS

**Globalement, si l'on prend en compte l'investissement pour l'installation électrique, le coût de l'abonnement et le prix moyen sur l'année du kWh, la solution triphasée revient plus cher que la solution monophasée. Avant d'opter pour une pompe à chaleur triphasée, il est raisonnable d'explorer toutes les solutions monophasées, y compris les choix comprenant un chauffage d'appoint non électrique tel que les poêles à bois. Certains bricoleurs exigent cependant le triphasé, par exemple, pour alimenter des machines outils. Les pompes à chaleur prélevant les calories dans l'air et incluant une résistance électrique d'appoint nécessitent un contrat d'abonnement de forte puissance. En effet, la puissance de cette résistance est toujours très élevée, 5 à 15 kW. Pour la rénovation, le changement de contrat électrique monophasé vers triphasé peut être quasiment impossible à cause du câblage existant. Dans ce cas, le choix d'une pompe à chaleur en monophasé s'impose.**

## Mise en garde

Attention aux pompes à chaleur fabriquées hors de France : les conditions tarifaires de raccordement aux réseaux électriques étant différentes selon les pays, les fabricants ne développent pas forcément de larges gammes de pompes à chaleur monophasées spécialement pour le marché français...

PARTIE 4

# ANNEXES

# Liste des DJU des stations d'observation par département

| Départements / Stations d'observation. | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| 01 Ain | | |
| Ambérieu | 2 626 | 252 |
| 02 Aisne | | |
| Éparcy | 2 963 | 160 |
| Saint Quentin | 2 724 | 98 |
| 03 Allier | | |
| Vichy | 2 508 | 250 |
| 04 Alpes de Haute Provence | | |
| Allos | 3 470 | 1 431 |
| Saint André les Alpes | 3 323 | 896 |
| Saint Auban sur Durance | 2 213 | 457 |
| 05 Hautes Alpes | | |
| Agnières en Dévoluy | 3 765 | 1 260 |
| Embrun | 2 870 | 871 |
| Gap-ville | 2 789 | 775 |
| Gap-col Bayard | 3 605 | 1 249 |
| Laragne | 2 626 | 573 |
| Le Monètier les Bains | 3 735 | 1 490 |
| Le Monètier-Sestrières | 4 475 | 2 000 |
| Orcières | 3 586 | 1 440 |
| Vars | 3 888 | 1 800 |
| 06 Alpes Maritimes | | |
| Andon-Thorenc | 3 150 | 1 168 |
| Antibes-Garoupe | 1 319 | 74 |



| Départements / Stations d'observation. | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| Antibes-ONM | 1 316 | 8 |
| Breil sur Roya | 1 977 | 221 |
| Cannes | 1 619 | 3 |
| Grasse | 1 742 | 211 |
| Isola | 2 925 | 870 |
| Monaco | 1 112 | 55 |
| Nice-Côte d'Azur | 1 465 | 2 |
| Puget Théniers | 2 150 | 420 |
| Saint Dalmas le Selvage | 3 349 | 1 510 |
| Saint Etienne de Tinée-Auron | 3 428 | 1 610 |
| Saint Jean Cap Ferrat | 1 202 | 138 |
| Vence | 1 867 | 321 |
| 07 Ardèche | | |
| Tournon | 2 314 | 123 |
| 08 Ardennes | | |
| Rocroi | 3 089 | 286 |
| Sedan | 2 939 | 153 |
| 09 Ariège | | |
| Aston | 2 425 | 556 |
| Auzat-Pradières | 2 895 | 1 200 |
| Couflens-Salau | 2 824 | 855 |
| L'Hospitalet près l'Andorre | 3 206 | 1 428 |
| Mérens les Vals | 2 835 | 1 094 |
| Saint Girons | 2 272 | 411 |
| Saintein-Eylie | 2 717 | 870 |
| 10 Aube | | |
| Romilly sur Seine | 2 620 | 77 |
| 11 Aude | | |
| Carcassonne | 1 930 | 123 |
| 12 Aveyron | | |
| Millau | 2 374 | 410 |
| Rueyres-Brommat | 2 703 | 732 |
| Villefranche de Rouergue | 2 176 | 250 |

| Départements<br>Stations d'observation. | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| 13 Bouches du Rône | | |
| Aix en Provence | 1 750 | 215 |
| Bec de l'Aigle-la Ciotat | 1 583 | 328 |
| Istres | 1 710 | 23 |
| Marseille-Cap Croisette | 1 373 | 116 |
| Marseille-Iles Pomègues | 1 421 | 69 |
| Marseille-Marignane | 1 790 | 3 |
| Marseille-Observatoire | 1 627 | 75 |
| Port de Bouc | 1 664 | 8 |
| Salon de Provence | 1 853 | 59 |
| 14 Calvados | | |
| Caen | 2 451 | 66 |
| Dauville-Saint Gatien | 2 517 | 144 |
| Longues sur mer | 2 412 | 66 |
| Villerville | 2 419 | 113 |
| 15 Cantal | | |
| Aurillac | 2 921 | 680 |
| Chalvignac-l'Aigle | 2 412 | 300 |
| Ferri res-Saint Mary | 2 926 | 663 |
| Lafeuillade en Vézie | 2 898 | 760 |
| Lavastrie-Grandval | 3 035 | 830 |
| Le Claux | 3 255 | 1 050 |
| Marcolès | 2 808 | 710 |
| Marmanhac | 2 929 | 650 |
| Massiac | 2 935 | 535 |
| Saint Flour | 3 302 | 906 |
| 16 Charente | | |
| Angoulême | 2 136 | 83 |
| Cognac | 2 077 | 30 |
| 17 Charente maritime | | |
| Chassiron-Oléron | 1 853 | 11 |
| Ile d'Aix | 1 846 | 7 |
| La Rochelle-Laleu | 2 025 | 14 |
| La Rochelle-Port | 1 945 | 1 |
| Pointe de la Courbe | 1 864 | 6 |
| Rochefort sur Mer | 2 057 | 3 |





| Départements<br>Stations d'observation. | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| 18 Cher | | |
| Avord | 2 487 | 177 |
| Bourges-Météo | 2 453 | 156 |
| Bourges-observatoire | 2 418 | 153 |
| 19 Corr ze | 2 250<br>à<br>3 200 | 100<br>à<br>980 |
| 20 Corse | | |
| Ajaccio-Campo del Oro | 1 531 | 4 |
| Ajaccio-la Parata | 1 207 | 152 |
| Albertacce-Popaja | 3 022 | 1 074 |
| Bastia-Poretta | 1 478 | 10 |
| Bonifacio-Cap Pertusato | 1 259 | 105 |
| Calvi-Cap Cavallo | 1 460 | 290 |
| Calvi-Sainte Catherine | 1 384 | 57 |
| Cap Corse | 1 126 | 110 |
| Carbini-Marghèse | 2 774 | 980 |
| Pila-Canale | 1 538 | 360 |
| Sartène-Madonina | 1 741 | 50 |
| Solenzara | 1 305 | 17 |
| 21 Côte d'Or | | |
| Baigneux les Juifs | 2 868 | 409 |
| Châtillon sur Seine | 2 748 | 263 |
| Dijon-Larrey | 2 626 | 316 |
| Dijon-Longvic | 2 675 | 220 |
| 22 Côtes d'Armor | | |
| Ile de Bréhat | 2 025 | 35 |
| Mur de Bretagne-Guerlédan | 2 334 | 128 |
| Perros-Guirrec-Ploumanac'h | 2 105 | 78 |
| Plévenon-Cap Fréhel | 2 133 | 60 |
| Rostrenen | 2 445 | 262 |
| Saint Cast | 2 115 | 46 |
| 23 Creuse | | |
| La Courtine | 3 061 | 765 |

| Départements / Stations d'observation. | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| 24 Dordogne | | |
| Bergerac | 2 079 | 31 |
| 25 Doubs | | |
| Besançon | 2 719 | 311 |
| Charquemont | 3 548 | 870 |
| 26 Drôme | | |
| Lusèle croix Haute | 3 389 | 1 036 |
| Montélimar | 2 121 | 73 |
| Monségur sur Lauzon | 2 214 | 150 |
| Nyons | 2 226 | 260 |
| 27 Eure | 2 500 à 2 600 | 150 |
| 28 Eure et Loir | | |
| Chartres | 2 586 | 155 |
| Chateaudun | 2 521 | 127 |
| 29 Finistère | | |
| Brest-Guipavas | 2 180 | 98 |
| Brest-Tour César | 1 990 | 44 |
| Fouesnant | 2 043 | 60 |
| Ile de Batz | 2 032 | 36 |
| Ile d'Ouessant | 1 878 | 25 |
| Ile Penfret-les Glénants | 1 869 | 25 |
| Landéda-Aber Wrac'h | 2 022 | 38 |
| Lanvéoc-Poulmic | 2 103 | 79 |
| Pointe de Penmarc'h | 1 894 | 16 |
| Pointe du Raz | 1 891 | 85 |
| Pointe Saint mathieu | 1 898 | 17 |
| Pointe du Tourlinguet-Camaret | 1 948 | 46 |
| 30 Gard | | |
| Mont Aigoulal | 3 928 | 1 567 |
| Nîmes-Courbessac | 1 782 | 59 |
| 31 Haute Garonne | | |
| Bagnère de Luchon | 2 511 | 630 |





| Départements / Stations d'observation. | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| Toulouse-Blagnac | 2 070 | 147 |
| Toulouse-Francazals | 2 016 | 161 |
| Toulouse-Observatoire | 2 035 | 194 |
| 32 Gers | 2 000 à 2 150 | 80 à 380 |
| 33 Gironde | | |
| Bordeaux-Mérignac | 2 037 | 47 |
| Bordeaux-Observatoire | 1 896 | 74 |
| Cap-Ferret | 1 652 | 9 |
| Cazaux | 1 927 | 24 |
| Villenave d'Ornon | 1 987 | 25 |
| 34 Hérault | | |
| Montpellier-Bel Air | 1 703 | 81 |
| Montpellier-Fréjorgues | 1 825 | 5 |
| Sète | 1 520 | 94 |
| 35 Ille-et-Vilaine | | |
| Cancale-Pointe du Grouin | 2 118 | 40 |
| Dinard-Pleurtuit | 2 257 | 65 |
| Rennes | 2 292 | 35 |
| 36 Indre | | |
| Châteauroux | 2 403 | 160 |
| 37 Indre-et-Loire | | |
| Tours | 2 338 | 96 |
| 38 Isère | | |
| Alpe-de-Venosc | 3 489 | 1 400 |
| Besse-en-Oisans | 3 700 | 1 470 |
| Grenoble-Eybens | 2 614 | 223 |
| La Côte-St-André | 2 730 | 360 |
| La Tour-du-Pin | 2 862 | 339 |
| Mont-de-Lans | 3 433 | 1 050 |
| Pellafol-Le Sautet | 3 309 | 800 |
| St Hilaire-du-Touvet | 3 352 | 1 150 |
| Vienne | 2 646 | 213 |
| Villard-de-lans | 3 451 | 1 050 |

| Départements<br>Stations d'observation. | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| 39 Jura | | |
| Saint-Claude-Etables | 2 918 | 400 |
| 40 Landes | | |
| Biscarosse | 1 757 | 23 |
| Dax | 1 785 | 31 |
| Mont-de-Marsan | 2 036 | 59 |
| 41 Loir-et-Cher | | |
| Romorantin | 2 467 | 84 |
| 42 Loire | | |
| Saint-Étienne-Bouthéon | 2 636 | 399 |
| 43 Haute Loire | | |
| Le Puy-en-Velay | 2 905 | 714 |
| 44 Loire-Atlantique | | |
| Ecoublac-La Baule | 2 074 | 5 |
| Nantes-Château-Bougon | 2 199 | 26 |
| Nantes-Observatoire | 2 214 | 41 |
| Saint-Nazaire-Chemoulin | 2 087 | 24 |
| Saint-Nazaire-Montoir | 2 157 | 3 |
| 45 Loiret | | |
| Orléans-Bricy | 2 532 | 124 |
| 46 Lot | | |
| Gourdon | 2 132 | 205 |
| 47 Lot-et-Garonne | | |
| Agen | 2 078 | 61 |
| 48 Lozère | 2 700 à 3 500 | 400 à 1 700 |
| 49 Maine-et-Loire | | |
| Angers | 2 308 | 54 |
| Baugé | 2 312 | 51 |
| 50 Manche | | |
| Cap de la Hague | 2 070 | 3 |
| Cherbourg | 2 118 | 8 |





| Départements<br>Stations d'observation. | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| Granville-Pointe-du-Roc | 2 219 | 37 |
| Ile Chausey | 2 115 | 40 |
| Pointe de Barfleur | 2 145 | 4 |
| Portbail | 2 228 | 30 |
| 51 Marne | | |
| Mourmelon-le-Grand | 2 709 | 131 |
| Reims | 2 665 | 94 |
| 52 Haute Marne | | |
| Langres | 2 954 | 464 |
| Saint-Dizier | 2 615 | 139 |
| 53 Mayenne | 2 300 à 2 550 | 30 à 420 |
| 54 Meurthe-et-Moselle | | |
| Nancy | 2 854 | 203 |
| Saint-Nicolas-de-Port | 2 771 | 210 |
| Toul | 2 923 | 390 |
| 55 Meuse | | |
| Bar-le-Duc-Loxéville | 2 985 | 313 |
| Haudiomont | 2 968 | 268 |
| 56 Morbihan | | |
| Carnac | 2 043 | 2 |
| Grand Mont-Saint-Gildas-de-Rhuys | 2 052 | 33 |
| Groix-Beg-Melen | 1 957 | 48 |
| Lorient-Lann Bihouée | 2 163 | 42 |
| Pointe de Gâvres | 2 001 | 18 |
| Pointe du Talut-Belle-Ile-en-mer | 1 935 | 42 |
| Port-Louis | 2 068 | 19 |
| 57 Moselle | | |
| Château-Salins | 2 818 | 220 |
| Gondrexange | 2 927 | 270 |
| Kerling-lès-Sierck | 2 940 | 260 |
| Metz-Écluse | 2 797 | 170 |
| Metz-Météo | 2 838 | 189 |

| Stations d'observation. / Départements | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| Phalsbourg | 2 981 | 377 |
| Sarreguemines | 2 844 | 200 |
| Thionville | 2 773 | 157 |
| **58 Nièvre** | | |
| Château-Chinon | 2 858 | 598 |
| Nevers | 2 536 | 176 |
| **59 Nord** | | |
| Cambrai-Épinoy | 2 720 | 75 |
| Dunkerque | 2 555 | 7 |
| Lille-Lesquin | 2 693 | 55 |
| Lille-Université | 2 495 | 32 |
| Valenciennes | 2 694 | 52 |
| **60 Oise** | | |
| Beauvais | 2 680 | 101 |
| Compiègne | 2 577 | 41 |
| Creil | 2 636 | 88 |
| **61 Orne** | | |
| Alençon | 2 537 | 73 |
| **62 Pas-de-Calais** | | |
| Boulogne-sur-Mer | 2 537 | 73 |
| Calais | 2 588 | 2 |
| Cap Griz-Nez | 2 545 | 45 |
| Le Touquet | 2 518 | 5 |
| Saint-Inglevert-Marquise | 2 644 | 122 |
| **63 Puy-de-Dôme** | | |
| Auzat-sur-Allier-La Combelle | 2 661 | 415 |
| Besse-en-Chandesse | 3 749 | 1 050 |
| Châteauneuf-les-Bains | 2 678 | 390 |
| Clermont-Ferrand-Aulnat | 2 509 | 329 |
| Clermont-Ferrand-Observatoire | 2 500 | 403 |
| Égliseneuve-d'Entraigues | 3 385 | 985 |
| Fournols-d'Auvergne | 3 513 | 1 050 |
| Le Mont-Dore | 3 342 | 1 050 |
| Picherande | 3 338 | 1 123 |





| Stations d'observation. / Départements | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| Puy-de-Dôme | 3 918 | 1 465 |
| Saint-Anthème | 3 350 | 950 |
| Saint-Nectaire | 3 016 | 718 |
| Viverols | 3 226 | 850 |
| **64 Pyrénées-Atlantiques** | | |
| Biarritz-Aérodrome | 1 610 | 69 |
| Biarritz-Ville | 1 432 | 28 |
| Lac d'Artouste | 4 083 | 2 000 |
| Laruns | 2 364 | 523 |
| Pau | 2 048 | 189 |
| Pointe-de-Socoa | 1 596 | 24 |
| **65 Hautes Pyrénées** | | |
| Gèdre | 2 834 | 1 000 |
| Lassoula | 3 606 | 1 700 |
| Pic du Midi de Bigorre | 5 243 | 2 860 |
| Tarbes-Ossun | 2 166 | 360 |
| **66 Pyrénées-Orientales** | | |
| Cap Béar | 1 355 | 100 |
| Font-Romeu | 3 602 | 1 705 |
| La Llagonne | 3 931 | 1 714 |
| Perpignan | 1 464 | 43 |
| Prats de Mollo | 2 397 | 1 000 |
| Puyvalador | 3 640 | 1 400 |
| **67 Bas Rhin** | | |
| Howald-Melkereifelsen | 3 310 | 775 |
| Montbronn-Neumatt | 3 069 | 330 |
| Strasbourg-Entzheim | 2 827 | 151 |
| Strasbourg-Ville | 2 706 | 139 |
| Zinswiller | 2 954 | 185 |
| **68 Haut Rhin** | | |
| Ballon de Guebwiller | 4 036 | 1 390 |
| Colmar-Meyenheim | 2 778 | 209 |
| Colmar-Ville | 2 575 | 190 |
| Lac Noir | 3 617 | 960 |
| Mulhouse-Bâle | 2 948 | 267 |

| Départements / Stations d'observation. | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| **69 Rhône** | | |
| Lyon-Bron | 2 499 | 196 |
| Saint-Genis-Laval | 2 450 | 286 |
| Larare-les-Sauvages | 3 012 | 720 |
| **70 Haute Saône** | | |
| Lac d'Alfred | 3 101 | 620 |
| Luxeuil-les-Bains | 2 944 | 272 |
| **71 Saône-et-Loire** | | |
| Chalon-sur-Saône | 2 638 | 179 |
| La Guiche | 2 638 | 450 |
| Mâcon | 2 600 | 216 |
| Mont-Saint-Vincent | 2 935 | 602 |
| Saint-Yan | 2 638 | 244 |
| **72 Sarthe** | | |
| Le Mans | 2 428 | 52 |
| **73 Savoie** | | |
| Bourg-Saint-Maurice | 3 096 | 865 |
| Challes-les-Eaux | 2 797 | 291 |
| Lanslebourg-Mont-Cenis | 4 556 | 1 925 |
| Pralognan-La Vanoise | 3 813 | 1 420 |
| Tignes-le-Villaret | 3 996 | 1 750 |
| Valloire | 3 452 | 1 296 |
| **74 Haute Savoie** | | |
| Abondance | 3 577 | 1 000 |
| Annecy | 2 756 | 448 |
| Annemasse | 3 006 | 445 |
| Les Contamines-Montjoie | 3 644 | 1 200 |
| Les Gets | 3 807 | 1 200 |
| Thonon-les-Bains | 2 781 | 375 |
| Usinens | 2 671 | 417 |
| Vallorcine | 3 869 | 1 260 |
| **75 Paris** | | |
| Paris-Montsouris | 2 406 | 78 |
| Paris-Tour-Saint-Jacques | 2 220 | 38 |





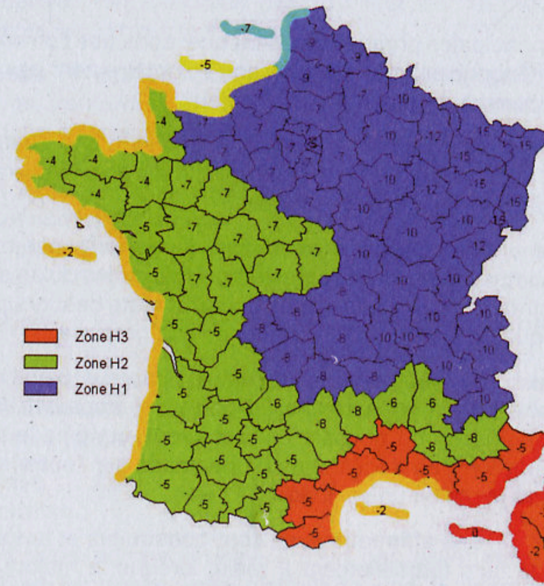
| Départements / Stations d'observation. | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| **76 Seine-Maritime** | | |
| Cap de la Hève | 2 380 | 100 |
| Dieppe | 2 505 | 33 |
| Fécamp | 2 451 | 104 |
| Rouen | 2 569 | 68 |
| **77 Seine-et-Marne** | | |
| Coulommiers-Voisins | 2 626 | 141 |
| Melun-Villaroche | 2 547 | 91 |
| Sainte-Assise | 2 520 | 56 |
| **78 Yvelines** | | |
| Trappes | 2 632 | 167 |
| Villacoublay | 2 659 | 171 |
| **79 Deux-Sèvres** | 2 100 à 2350 | 10 à 270 |
| **80 Somme** | | |
| Abbeville | 2 607 | 57 |
| **81 Tarn** | 1 450 à 2 250 | 120 à 1250 |
| **82 Tarn-et-Garonne** | 2 050 à 2 150 | 70 à 500 |
| **83 Var** | | |
| Brignoles | 1 982 | 205 |
| Cap Camarat-Saint-Tropez | 1 356 | 110 |
| Cap Sicié-La Seyne | 1 656 | 321 |
| Collobrières | 1 817 | 153 |
| Cuers | 1 660 | 82 |
| Draguignan | 1 898 | 181 |
| Ile du Levant-Titan | 1 332 | 100 |
| Ile de Porquerolles | 1 341 | 146 |
| Le Luc-en-Provence | 1 690 | 91 |
| Plan d'Aups | 2 589 | 679 |
| Saint-Raphaël | 1 583 | 2 |
| Toulon-Marine | 1 377 | 23 |
| Toulon-La Mître | 1 396 | 28 |

| Départements / Stations d'observation. | DJU | Altitude (en m) |
|---|---|---|
| 84 Vaucluse | | |
| Apt | 2 171 | 234 |
| Avignon-Montfavet | 1 998 | 40 |
| Cavaillon | 2 023 | 80 |
| Gordes | 2 229 | 350 |
| Mont-Ventoux | 4 277 | 1 912 |
| Orange | 1 964 | 53 |
| 85 Vendée | | |
| Ile d'Yeu | 1 877 | 32 |
| La Motte-Achard | 2 214 | 47 |
| Les Sables-d'Olonne | 2 143 | 9 |
| 86 Vienne | | |
| Poitiers | 2 363 | 118 |
| 87 Haute Vienne | | |
| Limoges | 2 520 | 282 |
| 88 Vosges | | |
| Epinal | 2 875 | 385 |
| 89 Yonne | | |
| Auxerre | 2 535 | 207 |
| 90 Territoire de Belfort | | |
| Belfort | 2 939 | 422 |
| 91 Essonne | | |
| Brétigny-sur-Orge | 2 498 | 78 |
| Étampes-Mondésir | 2 632 | 145 |
| Toussus-le-Noble | 2 688 | 160 |
| 92 Hauts-de-Seine | 2 500 | |
| 93 Seine-Saint-Denis | | |
| Paris-Le Bourget | 2 464 | 52 |
| 94 Val-de-Marne | | |
| Paris-Orly | 2 510 | 89 |
| Paris-Parc Saint-Maur | 2 440 | 50 |
| 95 Val-d'Oise | | |
| Pontoise-Cormeilles | 2559 | 98 |





# CARTE DES TEMPÉRATURES DE BASE PAR DÉPARTEMENT ET EN ZONES CÔTIÈRES




Températures de base (°C) par départements et en zones côtières

# Foire aux questions

Voici les principales phrases types ou questions que l'on entend, soit par méconnaissance du sujet, soit volontairement par idéologie, ou comme arguments commerciaux.

**Question** Une pompe à chaleur en relève d'une chaudière permet d'économiser de l'énergie fossile, mais au prix que coûte l'électricité, est-ce bien économique ?

**Réponse** Même avec un coefficient de performance moyen de 3, la pompe à chaleur consomme trois fois moins qu'un chauffage électrique classique (par effet Joule) et reste beaucoup plus économique qu'une chaudière à fioul ou gaz propane.

**Question** La géothermie horizontale (capteur plan) transforme votre terrain en patinoire (!), épuise et appauvrit le sol, empèche le gazon de pousser correctement, congèle le sol au point que la terre ne dégèle plus d'une année sur l'autre, transforme votre jardin en un sol lunaire ! ! ! etc.

**Réponse** Ces affirmations se sont construites et amplifiées à partir de faits (partiellement !) réels, lorsque la majorité des capteurs plans étaient sous-dimensionnés et/ou enterrés beaucoup trop profondément. À l'heure actuelle, si les règles de l'art sont appliquées, ces capteurs fonctionnent parfaitement, y compris à long terme (recul > 15 ans).

**Question** L'investissement dans un chauffage par pompe à chaleur eau glycolée/eau est trop important, il ne peut pas s'amortir, une installation tout électrique est tellement plus abordable…

**Réponse** À raison d'une consommation quatre fois inférieure, le surcoût d'une pompe à chaleur s'amortit rapidement : généralement entre 8 et 12 ans. Certes, dans les régions méditerranéennes où le besoin de chauffage est faible, l'amortissement devient très long (plus de 15 ans). Dans ce dernier cas, il reste les installations air/air qui présentent un investissement faible et offrent la fonction climatisation, ou mieux, le chauffage solaire si possible avec une maison bioclimatique.





**Question** Le chauffage par pompe à chaleur n'utilise pas les énergies renouvelables puisqu'il faut de l'électricité pour alimenter le compresseur.

**Réponse** Les pompes à chaleur utilisent entre 2/3 et 4/5 d'énergie renouvelable par rapport à l'énergie totale utilisée. Pour faire circuler l'eau dans un capteur solaire, il faut aussi de l'électricité. Pour abattre des arbres, les transporter, les débiter, il faut aussi de l'énergie. À partir de quel ratio, entre ce que l'on consomme et ce que la nature fournit réellement gratuitement, considère-t-on qu'une installation est « écologiquement correcte » ? Vaste débat… qui ne fait pas l'objet de ce livre.

**Question** La pompe à chaleur qui m'a été vendue ne parvient pas à chauffer ma maison : la température ambiante plafonne vers 17 °C dès qu'il fait bien froid dehors. Je vais demander à l'installateur qu'il m'en fournisse une capable de chauffer l'eau à plus haute température.

**Réponse** Attention de ne pas confondre puissance et température :

- Soit cette pompe à chaleur n'est pas assez puissante, ce qui ne lui permet pas d'atteindre une température d'eau (ou d'air) suffisante. Dans ce cas, elle ne s'arrête jamais de fonctionner.
- Soit le débit d'eau dans le circuit de chauffage est insuffisant. Dans ce cas, la machine s'arrête régulièrement car la température de départ d'eau est maximale mais le faible débit d'eau ne suffit pas à extraire la puissance fournie par la pompe à chaleur.
- Soit effectivement les radiateurs sont trop petits, donc ils auraient besoin d'une température d'eau plus élevée que ce que la pompe à chaleur peut fournir.

**Question** Les pompes à chaleur fonctionnent avec du Fréon, qui est très destructeur de la couche d'ozone.

**Réponse** Fréon est une marque déposée. Cette affirmation fait référence aux anciens fluides frigorigènes de type CFC. Actuellement, toutes les nouvelles pompes à chaleur fonctionnent avec des HFC ou mieux des HC non nuisibles pour la couche d'ozone.

**Question** Comment se fait-il qu'entre deux devis, pour une même installation de chauffage par pompe à chaleur, la puissance proposée varie d'un facteur deux ?

**Réponse** Une pompe à chaleur ne se dimensionne pas avec la même marge de surpuissance qu'une chaudière. Elle doit couvrir seulement 110 % à 120 % des déperditions maximales de l'habitation. Dans tous les cas, il est souhaitable de faire réaliser l'étude thermique de l'habitation par un cabinet spécialisé et indépendant.

**Question** Le ballon tampon est indispensable pour éviter les cycles courts de la pompe à chaleur.

**Réponse** Pour une pompe à chaleur couplée uniquement sur un plancher chauffant, le ballon tampon n'a aucun intérêt. Il dégrade même le COP, puisqu'il oblige la pompe à chaleur à maintenir l'eau du ballon à une température supérieure à celle du plancher chauffant. Si l'installation comporte des radiateurs, le ballon tampon se justifie pleinement, soit monté en série, soit placé en parallèle sur la pompe à chaleur.

**Question** Quelle est la durée de vie d'une pompe à chaleur ?

**Réponse** La durée de vie de la machine est liée principalement à celle du compresseur. Voici notre expérience sur des installations anciennes que nous suivons :

Un compresseur à piston a « rendu l'âme » après 27 000 heures de fonctionnement, soit une utilisation sur 25 ans.

Deux compresseurs Scroll sont toujours en service, ayant chacun 13 500 heures de fonctionnement sur une durée de 10 ans.





Sur l'un des premiers chauffages sol/sol, un compresseur rotatif est toujours en état. Après 15 ans, un autre compresseur rotatif a grillé au bout de 10 ans à cause d'une panne de la temporisation anti-courts cycles et de l'absence de relais thermique.

Le prix d'un compresseur représente environ 10 % du prix total d'une installation.

**Question** La nouvelle pompe à chaleur Unetelle offre un COP exceptionnel de 4,8 !

**Réponse** Vérifiez toujours à quel point de fonctionnement est donné le COP (température de la source froide et température de la source chaude). A cause des consommations annexes (circulateurs, ventilateurs), le COP global d'une pompe à chaleur ne dépasse pas celui donné par le fabricant du compresseur. L'organisme Eurovent effectue des mesures de COP à des points de fonctionnement réalistes : c'est à ces valeurs qu'il faut faire confiance.

**Question** Il est impossible d'installer une pompe à chaleur géosolaire chez moi car le terrain est argileux, trop pentu, trop caillouteux, trop humide, situé en altitude, orienté plein nord, etc.

**Réponse** Si le capteur plan est bien dimensionné en fonction de l'altitude, de l'orientation, et qu'il est placé dans un lit de sable, tous ces problèmes sont résolus. Les dénivelées supérieures à 2 mètres imposent le capteur à eau glycolée avec purges aux points hauts.

**Question** Est-ce possible de remplacer une chaudière fonctionnant avec des radiateurs haute température (60 à 65 °C) par une pompe à chaleur ?

**Réponse** Grâce à l'injection de vapeur, les pompes à chaleur peuvent désormais produire de l'eau à 65 °C avec un COP très convenable. À l'heure actuelle, peu de fabricants proposent cette nouvelle technologie (EVI) pour des pompes à chaleur air/eau. Certains proposent des pompes à chaleur à haute température avec du fluide frigorigène R134a, mais le COP est jusqu'à 20 % inférieur à celui obtenu avec la technologie EVI.

**Question** Une installation de chauffage par pompe à chaleur avec un plancher chauffant dans les pièces de jour et des radiateurs dans les pièces de nuit n'est-elle pas « idéale » à tous points de vue ?

**Réponse** Non ! La performance de la pompe à chaleur est meilleure si elle fonctionne uniquement sur un plancher chauffant basse température. Le coût d'une régulation mixte pour plancher chauffant et radiateurs est élevé. La fiabilité d'une installation simple est supérieure à celle d'une installation complexe. Le confort des planchers chauffants dans les chambres est irréprochable.

**Question** Les échangeurs thermiques engendrent des pertes dans une pompe à chaleur.

**Réponse** Bien isolé, un échangeur n'a quasiment aucune perte vers l'extérieur. Il n'y a donc pas d'énergie « perdue ». Par contre, il provoque toujours un écart de température entre les fluides qui échangent leur chaleur. La température d'évaporation se trouve abaissée et/ou la température de condensation élevée, ce qui conduit, in fine, à une baisse du COP de la pompe à chaleur.

**Question** Si les étés caniculaires devenaient fréquents, les pompes à chaleur pourraient-elles apporter une solution économique et écologique pour rafraîchir les habitations existantes (hors concept bioclimatique) ?

**Réponse** À l'heure actuelle, les problèmes écologiques liés à la généralisation de la climatisation sont dus principalement à deux phénomènes préoccupants :

- L'utilisation de fluides frigorigènes, contribuant fortement à l'effet de serre, rejetés accidentellement dans l'atmosphère (fuites ou erreurs de manipulation).
- La consommation électrique sur le réseau en été, avec de surcroît une performance énergétique inférieure pour générer du froid que pour transférer de la chaleur.

Le premier point peut être réglé à court terme par l'utilisation des fluides de types HC (hydrocarbures). À plus long terme,





l'usage du $CO_2$, comme dans certaines climatisations automobiles apporterait une excellente réponse.

Pour le second point, l'association de la production d'électricité photovoltaïque locale et de l'électronique de puissance permet de faire fonctionner une climatisation en toute autonomie par rapport au réseau électrique. La production de froid devient maximale lorsque l'ensoleillement l'est aussi.

**Question** Quelle est la place des pompes à chaleur en rénovation de l'habitat ?

**Réponse** Les premiers investissements à effectuer, à nos yeux, sur une rénovation, consistent à améliorer substantiellement l'isolation. À ce propos, les aides de l'état allouées pour les chauffages propres et économiques devraient être conditionnées par la vérification préalable d'une isolation correcte des bâtiments. Ainsi, le chauffage par pompe à chaleur fonctionnerait dans de meilleures conditions. Les déperditions seraient plus faibles grâce à l'amélioration de l'isolation et les radiateurs d'origine pourraient suffire malgré une température d'eau inférieure. Avant d'entreprendre le remplacement d'un système de chauffage central par une pompe à chaleur, nous recommandons de vérifier la température d'eau en entrée des radiateurs. Si cette température est supérieure à 60 °C, il conviendra d'augmenter la surface d'échange : soit avec des radiateurs supplémentaires, soit en remplaçant ceux existants. Il faudra autant que possible utiliser une source froide efficace : nappe phréatique ou forage profond par exemple. Les nouvelles pompes à chaleur hautes températures (EVI) devraient apporter une réponse efficace pour la rénovation.

**Question** Une pompe à chaleur air/air assurant le renouvellement d'air peut-elle remplacer avantageusement la VMC classique de l'habitation ?

**Réponse** Comme nous l'avons vu au chapitre concernant l'ECS, le débit d'air tiède rejeté par la VMC ne permet de récupérer qu'une puissance < 2 kW. Avec des maisons isolées selon les critères de la Réglementation Thermique 2005, cette puissance est insuffisante pour le chauffage. Le standard Suisse

« Minergie » abaisse les besoins énergétiques d'un facteur 4 par rapport à la RT2005, tandis que les maisons « Passives » les divisent par 10. Cependant, nous constatons comme nos voisins suisses et allemands que le meilleur compromis pour la VMC reste le système double flux avec une alimentation en air neuf via un puits canadien. En effet, comment avec une pompe à chaleur pourrait-on obtenir un COP meilleur qu'un simple échangeur air/air d'une VMC double flux ?

**Question** Quelle est la place des pompes à chaleur dans les maisons super isolées telles celles au standard « Minergie » ou celles dites « Passives ».

**Réponse** Les maisons « Minergie » peuvent adopter un chauffage par pompe à chaleur à haute performance, tandis que les « Passives » n'ont théoriquement plus besoin de système de chauffage. Dans les deux cas, la pompe à chaleur reste très intéressante pour obtenir l'ECSéconomiquement en relève de capteurs solaires. Les calories sont prélevées sur l'air extrait de l'habitation juste avant son rejet vers l'extérieur, en aval d'une VMC double flux par exemple.

**Question** Un bon bricoleur peut-il se faire lui-même son chauffage par pompe à chaleur ?

**Réponse** La partie étude du circuit frigorifique nécessite bon nombre de connaissances (thermique, thermodynamique, mécanique des fluides), mais que l'on peut acquérir en lisant des ouvrages spécialisés. La partie réalisation pose plus de problèmes car il faut se procurer de l'outillage spécialisé et onéreux (jeux de manomètres appelés aussi *manifold*, pompe à vide, chalumeau, outils pour travailler le cuivre dont les diamètres sont en pouces, etc.). Le blocage majeur peut intervenir au niveau de l'approvisionnement en fluide frigorigène : la réglementation française impose d'avoir une autorisation préfectorale pour acheter ces produits. Certains bricoleurs ont contourné cette difficulté en utilisant du gaz propane ! Nous déconseillons cette pratique réellement risquée.

Pour les personnes qui désirent s'investir au maximum dans leur chauffage, nous leur recommandons de négocier une pompe à





chaleur eau (glycolée)/eau seule, directement auprès d'un fabricant et de réaliser en autonomie le puisage des calories (capteur) et la restitution de la chaleur dans l'habitat (plancher chauffant, radiateurs...). Ces opérations de type plomberie sont intéressantes et permettent tout de même de réaliser une économie sur la partie main d'œuvre.

Notez que les aides de l'État tendent à limiter l'intérêt financier de mettre la main à la pâte…

# Les principales marques

## POMPES À CHALEUR POUR LE CHAUFFAGE

Aermec, http://www.aermec.fr

Airmat*, http://www.airmat-europe.com

Airmet, http://www.airmetgroup.fr

Alder, http://www.climat-energie.com

Airwell*, http://www.airwell.com

AJ-Tech*, http://www.ajtech.fr

Amzair*, http://www.ventilation.fr/geothermie.php

Atlantic*, http://www.atlantic.tm.fr

Avenir «nergie*, http://www.avenir-energie.com

Buderus*, http://www.buderus.fr

Carrier*, http://www.carrier.fr

Ciat*, http://www.ciat.fr

Capterre*/Geomodul*, http://www.europe-geothermie.com

Chappee*, http://www.chappee.com

Climastar*, http://www.climastar.fr

Clivet*, http://www.clivet.it

De Dietrich*, http://www.dedietrich-thermique.fr





Dimplex*, http://www.dimplex.fr

Electra* : voir Airwell

Enalsa*, http://www.enalsa.fr

Erset*, http://www.erset.fr

France géothermie*, http://www.france-geothermie.com

Gac, http://www.climdatec.com

Geothermik, http://www.geothermik.fr

Giordano*, http://www.giordano.fr

Ideal Standard*, http://www.ideal-standard.fr

Lemasson*, http://www.lemasson.fr

Multibéton*, http://www.multibeton-france.fr

Satag, http://www.satagthermotechnik.ch

Nexa*, http://www.nexa-france.com

Saunier Duval*, http://www.saunierduval.fr

Sofath*, http://www.sofath.com

Stiebel Eltron*, http://www.stiebel-eltron.fr

Technibel*, http://www.techr:ibel.com

Viessmann*, http://www.viessmann.fr

Vivralis*, http://www.vivralis.fr

Warmtec, http://www.warmtec.com

Waterkotte*, http://www.mondialgeothermie.fr

Wesper, http://www.wesper.com

Winverter*, http://www.winverter.fr

* : Matériels homologués par Promotelec.

## POMPES À CHALEUR POUR L'EAU CHAUDE SANITAIRE COUPLÉE AU CHAUFFAGE

Cerise Techniques*, http://www.cerise-techniques.com sur PAC Avenir Energie

Hautec*, http://www.hautec.net/

Nexa/Vivralis*

Stiebel Eltron*

Sofath*

Viessmann*

Waterkotte*

## POMPES À CHALEUR POUR L'EAU CHAUDE SANITAIRE INDÉPENDANTE

Dimplex*

Enalsa*

France géothermie*

Hautec*

Sofath*

## CLIMATISEURS RÉVERSIBLES

Airton, airton.fr

Aldes*, http://www.aldes.fr





Ambiothermeur*, http://www.ambio.fr

Daikin*, http://www.daikin.fr

Gac*, http://www.climdatec.com

Gree*, http://www.gree.com

Haier*, http://www.haiereurope.com

Hitachi*, http://www.hitachi.com

Hiyasu*, http://www.hiyasu.com

LG*, http://fr.lge.com

Mitsubishi*, mitsubishielectric.fr

Panasonic*, http://www.panasonicclim.com

Riello*, http://www.riello.fr

Rhoss, http://www.rhoss.com

Samsung*, http://www.samsung.com

Sharp*, http://www.sharp.fr

Thermoseme*, http://www.thermoseme.com

Toshiba*, http://www.toshibaclim.com

Vortice*, http://www.vortice-france.com

Winia*, http://www.winiamando.it

*: Matériels homologués par Promotelec.

# Glossaire

### AC/DC *inverter*

Termes anglais. Dispositif de commande électronique des moteurs destiné à faire varier leur vitesse. AC *inverter* désigne le variateur de vitesse à fréquence variable destiné aux moteurs asynchrones triphasés. DC *inverter* correspond au principe de pilotage électronique des moteurs sans balais (brushless en anglais) à aimants permanents. Cette commande indissociable du moteur permet la variation de vitesse.

### Adiabatique

Qualifie le fonctionnement d'un système sans échange de chaleur avec son environnement. Généralement cette hypothèse est bien adaptée aux régimes transitoires.

### Azéotropique

Se dit d'un fluide frigorigène qui change d'état à température rigoureusement constante. Par opposition : fluide zéotropique, dont la température varie pendant le changement de phase.

### Ballon tampon

Réserve de stockage d'eau chaude destinée à accumuler l'énergie fournie par la pompe à chaleur et à la restituer progressivement dans les appareils de diffusion de chaleur (radiateurs ou ventilo-convecteurs). Cet organe permet d'allonger les cycles de marche et d'arrêt de la pompe à chaleur.





### Bouteille de mélange

Réserve d'eau chaude, raccordée en sortie de pompe à chaleur, ayant plusieurs piquages côté utilisation et capable de fournir de l'eau à différentes températures (pour plancher chauffant et radiateurs par exemple).

### BP

Basse pression. Le circuit frigorifique depuis la sortie du détendeur jusqu'à l'aspiration du compresseur est sous basse pression.

### Bypasser ou ponter ou shunter

Prévoir la mise hors circuit d'un élément tout en maintenant la circulation d'eau dans le reste de l'installation.

### Capillaire

Long tube très fin servant d'organe de détente.

### Capacité calorifique

Quantité de chaleur qu'il faut fournir à un corps pour élever sa température de 1 K.

### Chaleur latente

Quantité d'énergie échangée à température constante lors du changement d'état d'un corps.

### Chronoproportionnel

Commande tout ou rien dont les temps de marche et les temps d'arrêt sont calibrés. Par exemple, pour une régulation de puissance d'un radiateur électrique, la commande chronoproportionnelle permet de faire varier sa puissance de 0 à 100 %. La fréquence des cycles de fonctionnement est généralement élevée (par exemple, un cycle marche/arrêt toutes les cinq minutes) pour que les inerties thermiques nivellent les variations de température. Les régulations de température chronopropor-

tionnelles sont bien adaptées aux chauffages électriques mais pas aux pompes à chaleur.

### Coefficient G

Ce coefficient était utilisé avant les Réglementations thermiques (RT) 2000 et 2005. Il estèremplacé par un coefficient Ubat qui représente les pertes du bâti divisée par la surface total des parois. Le coefficient G, longtemps utilisé, conserve cependant un intérêt pour l'habitat existant : G = coefficient de déperditions volumique exprimé en W/m³.K. Les maisons actuelles bien isolées offrent un G d'environ 0,8 W/m³.K.

### Compresseur

Organe électromécanique charger de comprimer le fluide frigorigène gazeux.

### Condensats

Eau issue de la condensation de l'air chaud et humide sur une surface froide. L'évaporateur provoque la condensation de l'air qui y circule. Les condensats produit par l'évaporateur des pompes à chaleur air/air ou air/eau doivent être canalisés et évacués.

### Condenseur

Échangeur de chaleur permettant de faire passer de réfrigérant de l'état gazeux à l'état liquide.

### COP

Coefficient de performance. Dans cet ouvrage traitant du chauffage nous évoquons uniquement le COP thermique. COP = Puissance thermique restituée/Puissance électrique consommée.

### Cycles courts

Temps de marche et d'arrêt trop brefs (< 10 mn) du compresseur.





### Détendeur

Dispositif capable de détendre le fluide frigorigène, c'est-à-dire de le faire passer d'une haute pression à une basse pression. La détente peut se faire avec un détendeur thermostatique qui asservit la surchauffe ou simplement avec un capillaire.

### Diagramme de Mollier

C'est un diagramme qui permet de décrire le cycle thermodynamique d'une machine frigorifique. Dans cet ouvrage nous ne considérons qu'un diagramme simplifié avec les pressions, les températures et l'enthalpie.

### Digital Scroll

Compresseur Scroll intégrant une spirale mobile commandée électromécaniquement dans le but de faire varier la puissance délivrée par le compresseur.

### DJU

Les degrés jours unifiés permettent d'évaluer la sévérité du climat. Pour chaque jour de la période de chauffage (232 jours) la différence entre 18 °C et la température extérieure moyenne du jour est notée. L'addition des 232 valeurs obtenues donne le nombre de DJU.

### dT

Différence de température entre deux corps, exprimée en Kelvin.

### Effet Joule

Chaleur dégagée par l'effet du courant électrique traversant un conducteur (une résistance électrique par exemple). La loi de Joule est $P = R \times I^2$ ; où P est la puissance dissipée dans une résistance en Watt ; R la valeur de la résistance en Ohm ; I le courant efficace circulant dans cette résistance.

### Enthalpie

C'est une grandeur dont la variation engendre l'absorption ou la génération de chaleur. L'unité est exprimée en Joules par kilogrammes (J/kg).

### Évaporateur

Échangeur de chaleur permettant de faire passer le réfrigérant de l'état liquide à l'état gazeux.

### EVI

*Enhance Vapor Injection* en anglais. Injection de vapeur au court du cycle de compression qui a pour but de diminuer la température des gaz surchauffés en sortie du compresseur. La pompe à chaleur peut alors produire de l'eau à 65 °C avec un COP amélioré (+ 13 %).

### Flash gaz

Décrit la présence de gaz en entrée du détendeur. Normalement le détendeur doit être alimenté exclusivement en liquide afin de réguler correctement le débit de fluide injecté dans l'évaporateur et donc asservir correctement la surchauffe.

### Fluide frigorigène ou réfrigérant

Fluide utilisé dans les installations frigorifiques et les pompes à chaleur. Il est capable de passer de l'état liquide à gazeux et vice et versa sous des pressions généralement supérieures à la pression atmosphérique. Lors de ces changements d'état (appelé aussi phases) il absorbe ou cède une grande quantité de chaleur.

### Free cooling

Système de rafraîchissement économique qui consiste à faire circuler l'eau glycolée d'un capteur directement dans le plancher chauffant. Le compresseur reste à l'arrêt, seuls les circulateurs consomment de l'énergie.





### Géosolaire

Barbarisme qui désigne le captage de calories dans la terre à faible profondeur et basse température.

### Géothermie

Science physique qui traite de l'énergie issue du centre de la terre.

### HP

Haute pression. Le circuit frigorifique depuis la sortie refoulement du compresseur jusqu'à l'entrée du détendeur est sous haute pression.

### Inversion du cycle frigorifique

Grâce à une vanne 4 voies, le parcours du fluide frigorigène est inversé entre l'évaporateur et le condenseur. Ce principe est très largement utilisé pour les climatiseurs réversibles.

### K

Kelvin. Unité de mesure de la température absolue. 0 K = – 273 °C. 27 °C = 300 K.

### Loi d'eau

Se dit d'une régulation de température d'eau de chauffage asservie sur la température extérieure selon une pente réglable.

### Maisons « Minergies », « Passives » et RT2005

La consommation énergétique (chauffage + ECS + ventilation en zone H1) d'une maison répondant à la RT2005 est de 130 kWh/m².an. Pour le standard suisse Minergie cette valeur n'est que de 42 kWh/m².an, et de 30 kWh/m².an (dont 15 kWh/m².an pour le chauffage au maximum) pour les maisons passives (passiv haus).

### Pertes de charge

Énergie à fournir sous forme de pression pour vaincre les frottements lorsqu'un fluide (liquide ou gazeux) circule dans une canalisation ou divers éléments (filtre, échangeur, vanne, etc.).

### Perturbations électromagnétiques

Parasites électriques indésirables circulant soit dans les conducteurs électriques soit dans l'air telles les ondes radio. Ces parasites ont pour effet, par exemple, de brouiller la réception radio, perturber le bon fonctionnement ou endommager des appareils électroniques.

### Puits canadien (ou provençal)

Principe analogue au capteur plan géosolaire mais fonctionnant avec de l'air destiné à la ventilation d'une l'habitation. L'air neuf insufflé dans la maison passe par un réseau de tuyaux de 160 mm de diamètre, enterré vers 1,5 m de profondeur sur une longueur d'environ 25 m. Il est donc tempéré en hiver et rafraîchi en été. Dans les bâtiments très bien isolés ce système permet des économies de chauffage importantes et un grand confort en été.

### Surchauffe

Différence entre la température des gaz en sortie d'évaporateur (mesurée au thermomètre de contact sur la canalisation de sortie d'évaporateur) et la température d'évaporation (mesurée sous forme de pression avec le manomètre, au même endroit). Cette valeur doit être comprise entre 5 et 8 K pour bien utiliser l'évaporateur tout en évitant au compresseur d'aspirer du liquide.

### Sous refroidissement

Différence entre la température de condensation (mesurée sous forme de pression avec le manomètre dans le condenseur) et la température du liquide en sortie de condenseur (mesurée au thermomètre de contact sur la canalisation de sortie du condenseur). Cette valeur doit être comprise entre 4 et 7 K pour bien utiliser le condenseur et éviter les flashs gaz au détendeur.





### Source froide

Milieu où l'on puise des calories à basse température.

### Source chaude

Milieu où l'on restitue des calories à haute température.

### Split

De l'anglais : scinder. Se dit habituellement des pompes à chaleur air/air (le plus souvent destinées à climatiser) dont les échangeurs ne sont pas dans la même enveloppe, par opposition aux machines monobloc. Un échangeur se trouve dans une unité placée à l'extérieur de l'habitation avec le compresseur et les organes annexes du circuit frigorifique, l'autre échangeur prend place dans l'habitation. Par extension les multi-splits désignent les configurations où il existe plusieurs échangeurs intérieur (un par pièce idéalement). Une unité extérieure peut être couplée à 3 ou 4 échangeurs intérieurs.

### Scroll

Technologie de compresseur utilisant deux spirales emboîtées l'une dans l'autre. Une des spirale est fixe tandis de la seconde effectue un mouvement orbital.

### Température de Base

Température moyenne minimale d'un lieu dépendant de la situation géographique (zone H1, H2 ou H3, altitude, orientation, etc) et servant aux calculs des déperditions maximales des habitations.

### Thermodynamique

Science qui traite des comportements thermiques des corps, de l'énergie et de ses transformations. Étude des propriétés des systèmes dans lesquels interviennent des notions de température et de chaleur en relation avec des phénomènes mécaniques.

### Ventilo-convecteurs

Appareils de chauffage ou de climatisation constitués d'un échangeur à air ventilé. Le tube qui circule au milieu des ailettes véhicule soit de l'eau soit du fluide frigorigène.

### Volume balayé

Cylindrée utile du compresseur (hors volume mort). Contrairement aux compresseurs à pistons, les Scroll et rotatifs n'ont pas de volume mort ce qui explique en partie leurs meilleures performances. La puissance d'un compresseur est proportionnelle à son volume balayé.

### Zone climatique

En France, trois zones climatiques ont été identifiées. H1 est la zone la plus froide, H2 est une zone aux températures intermédiaires et H3 une zone aux températures douces.



# Bibliographie

## LIVRES ET PUBLICATIONS

*Les énergies renouvelables. Histoire, état des lieux et perspectives*, Jean Christian Lhomme.

*Chauffage de l'habitat et énergie solaire*, Thierry Cabirol, Daniel Roux.

*Petit guide de l'entretien-dépannage des installations frigorifiques*, H. Noack.

*R22 replacement status*, James M. Calm, Dr Piotr A. Domanski.

*Why Hydrocarbons Save Energy*, I. L. Maclaine-cross, E. Leonardi.

*La production de froid dans le milieu agro-alimentaire, industriel et tertiaire (cahier 04 Juin 2004)*, Alex Bertrand.

*Pour l'assainissement du chauffage : Pompes à chaleur avec températures de départ de 65 °C*, Hansueli Bruderer, Hans Hohl.

*Pompe à chaleur haute température*, Frédéric Brand, Michèle Zehnder, Pr Daniel Favrat.

*Laboratoire d'énergétique industrielle*, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Réfrigération magnétique : http://www.techniques-ingenieur.fr/dossier/refrigeration_magnetique/RE28

# SITES INTERNET

chaleurterre.com : jeune site dont le forum est très riche, surtout pour la partie pompes à chaleur.

ciele.org : site qui traite des énergies renouvelables.

pac.ch : site suisse dédié aux pompes à chaleur.

thermexcel.com : site d'un très bon niveau technique qui traite de thermique.

ecopland.com : site d'un fabricant de matériel frigorifique, leader mondial dans la construction de compresseurs Scroll.

xpair.com : site dédié au génie climatique qui propose, entre autres, des formations.

espace-elec.com/promotelec (Systèmes thermodynamiques) : site de l'organisme Promotelec.

eurovent-certification.com : site de l'organisme certificateur Eurovent.

manicore.fr : site de Jean-Marc Jancovici.

ademe.fr : site de l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

promotelec.com : site de l'organisme certificateur Promotelec.

minergie.ch : site du standard suisse Minergie.

passiv.de : site des maisons passibes allemandes (passivhaus).



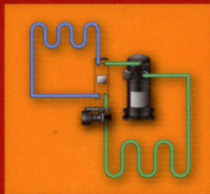
Dépôt légal : octobre 2009
N° d'éditeur : 8082
IMPRIMÉ EN FRANCE

Achevé d'imprimer le 15 octobre 2009
sur les presses de l'imprimerie « La Source d'Or »
63039 Clermont-Ferrand
Imprimeur n° 12479

*Dans le cadre de sa politique de développement durable,*
*La Source d'Or a été référencée IMPRIM'VERT®*
*par son organisme consulaire de tutelle.*
*Cet ouvrage est imprimé - pour l'intérieur -*
*sur papier recyclé « Cyclus Offset » 100 g*
*des Papeteries de France, fabriqué avec une pâte sans chlore*
*répondant à la certification TCF et à l'écolabel « Ange Bleu ».*
*L'usine opère selon les certifications environnementales*
*ISO 9001, 14001 et EMAS.*

Bruno Béranger





Pomper des calories dans un milieu à basse température pour les restituer dans un autre milieu à des températures plus élevées, tel est le fonctionnement d'une pompe à chaleur... Mais quel système choisir ? Où puiser les calories et comment les restituer ? Pour quelle combinaison opter (air/air, sol/sol, sol/eau, etc.) ? Pour quelles économies ? Quelles solutions pour un bon chauffage et une eau chaude sanitaire ?

Autant de questions, autant de réponses dans ce livre. Cette nouvelle édition, revue et augmentée vous offre une explication indispensable pour que ce nouveau mode de chauffage n'ait plus de secret pour vous !

*Cet ouvrage a été publié avec l'aide de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.*
Ademe : 6177

« Un guide pratique et sur mesure pour réaliser de véritables économies. »

Illustrations de couverture © Antoine Delor

Cet ouvrage est imprimé, pour l'intérieur, sur papier recyclé Cyclus, ce livre est ainsi plus respectueux de l'environnement.

Code éditeur : G12652
ISBN : 978-2-212-12652-5
9 €

www.editions-eyrolles.com
Groupe Eyrolles | Diffusion Geodif